Emiliano Ricci

LA FISICA IN CASA

Viaggio, stanza per stanza, tra fenomeni inaspettati e ingegnose scoperte

Emiliano Ricci

LA FISICA IN CASA

Viaggio, stanza per stanza, tra fenomeni inaspettati e ingegnose scoperte

Emiliano Ricci

La fisica in casa

Viaggio, stanza per stanza, tra fenomeni inaspettati e ingegnose scoperte

A Giulia e Leonardo, che spero ameranno la fisica;
a Ester, che mi aiuta a fargliela amare;
ai miei maestri, che me l'hanno fatta amare.

Prefazione

Felice colui che ha potuto conoscere l’essenza delle cose.
VIRGILIO

Nucleare sì o nucleare no? Che cosa sono gli organismi geneticamente modificati, meglio noti con la sigla OGM? Che opinione si può avere della fecondazione assistita?

Potremmo andare avanti con infiniti esempi, parlando di cambiamenti climatici e del Protocollo di Kyoto sulla riduzione delle emissioni di gas serra, oppure di nuove tecnologie per l’informazione e la comunicazione, parlando di *Echelon*, Grandi Fratelli e reti di spionaggio e intercettazione varie ed eventuali, oppure ancora di virus e malattie infettive emergenti, come l’HIV, la SARS o l’influenza aviaria.

Ogni giorno l’uomo della strada (il cosiddetto *layman* della cultura anglosassone) è sollecitato a prendere posizione su temi di argomento scientifico o tecnologico.

Ma gli strumenti per poter fare scelte ragionate, ponderate e soprattutto consapevoli su argomenti tanto importanti non sono mai troppi, e spesso sono inadeguati perché incomprensibili quanto il tema che vogliono chiarire. Un problema notevole, questo, se si pensa che proprio da queste scelte possono dipendere i destini di una regione, di una nazione o addirittura del mondo intero.

Ed è qui, a cercare di colmare questa lacuna, che interviene il divulgatore scientifico. Un po’ comunicatore, un po’ scienziato, il suo ruolo è proprio quello di fare da *trait d’union* fra la comunità scientifica e la società civile. Che, come tutti noi verifichiamo quotidianamente, parlano linguaggi

profondamente diversi.

Lo scienziato, infatti, usa termini tecnici, convenzioni ed espressioni che tipicamente non fanno parte del bagaglio culturale del *layman*, il quale ha quindi bisogno di una figura che "traduca" quel linguaggio in uno a lui comprensibile: il divulgatore scientifico, appunto. Ecco, il divulgatore scientifico si trova nella posizione tipica di un interprete, il quale traduce da una lingua incomprensibile ai più in una facilmente compresa. Risulta perciò fondamentale che questo interprete conosca sia l'una che l'altra, pena la perdita completa del contenuto del messaggio scientifico o una sua mistificazione.

La tecnologia e la scienza permeano ormai ogni aspetto della nostra vita. Il pubblico vuole sapere, imparare, conoscere. Vuole fare scelte consapevoli. Vuole partecipare attivamente alle decisioni politiche su temi che toccano la salute, l'ambiente, l'energia. Ecco perché, negli ultimi decenni (purtroppo non di pari passo con il progresso scientifico e tecnologico), il ruolo della divulgazione scientifica – che è un importante, se non il principale, strumento di marketing della scienza – è diventato sempre più rilevante. Alcuni scienziati hanno iniziato a divulgare le loro conoscenze, alcuni giornalisti e scrittori hanno acquisito competenze scientifiche per poi raccontarle, infine sono state inaugurate – anche in Italia – scuole di formazione post-laurea specifiche. Il cammino della divulgazione scientifica è ancora lungo, certo, ma la strada intrapresa sembra finalmente quella giusta. E in tale contesto, in continua evoluzione, si inserisce questo libro di divulgazione scientifica che è un po' particolare. Innanzi tutto perché è un esperimento sul linguaggio, affrontato proprio con lo spirito sopra citato della traduzione. Un tentativo – saranno poi i lettori a giudicare se riuscito o meno – di rendere il più possibile chiari e semplici alcuni concetti scientifici di base, e in particolare di fisica.

In secondo luogo perché in esso, ben lungi dall'essere impostato come un trattato scientifico, la fisica (ma non solo) non è assolutamente raccontata in maniera tradizionale: non si segue la suddivisione classica

degli argomenti (meccanica, termodinamica, elettromagnetismo e così via), né si procede con problemi e soluzioni di difficoltà crescente.

Punto di partenza di questo approccio non ortodosso è la nostra casa, che è un vero e proprio laboratorio di fisica, in cui tutti noi quotidianamente svolgiamo, spesso inconsciamente, esperimenti di varia natura.

Lo scopo che si propone questo libro è accendere nei lettori la curiosità di comprendere l'enorme varietà e complessità dei fenomeni che si verificano sotto i nostri occhi ogni volta che svolgiamo azioni anche apparentemente banali, come possono essere l'apertura di un rubinetto o l'accensione di una lampadina.

Un invito, quindi, non solo a comprendere la scienza e la tecnologia che ci circonda, ma anche e soprattutto all'esercizio del nostro cervello, delle sue capacità di deduzione e di ragionamento, e anche, perché no, una sollecitazione a porsi sempre domande, a non dare mai nulla per scontato e ad affrontare ogni cosa con una sana e buona dose di scetticismo. Perché, in un mondo in cui la confusione fra opinioni e realtà regna sovrana e in un tempo scosso da venti oscurantisti e da un irrazionalismo sfrenato (dall'astrologia alla parapsicologia, passando per quel vasto contenitore di argomentazioni pseudoscientifiche che va sotto il nome di New Age), la pratica dello scetticismo risulta quanto mai utile, se non addirittura necessaria.

Istruzioni per l'uso

Di un libro, di un'idea stravagante e di mille suggestioni

Una casa è una macchina per abitare.
LE CORBUSIER

Se qualcuno ce lo chiedesse, non esiteremmo un istante a rispondere che conosciamo perfettamente la nostra casa. Tutti noi, infatti, la consideriamo il nostro "rifugio", un luogo protetto e conosciuto, senza alcun segreto né mistero, un ambiente da cui non ci aspettiamo alcuna sorpresa. Anche quando pensiamo di aver perso qualcosa fra le mura di casa, un antico proverbio ci rassicura dicendo che «la casa nasconde, ma non ruba» e quindi, prima o poi, quel qualcosa riapparirà. Ma se è vero che la casa non ruba, è altrettanto vero che nasconde tanti segreti. Non c'è da preoccuparsi, però: stiamo parlando dei segreti scientifici e tecnologici che ogni casa ha e che in questo libro vogliamo svelare. Perché la finestra appena aperta sbatte? Come si formano le bolle di sapone? Come funziona il forno a microonde? E la pentola a pressione? Perché la trottola di nostro figlio si muove in quel modo curioso e il miele si arrotola su se stesso? La nostra casa è un vero e proprio laboratorio di fisica, dove le sue diverse branche (meccanica, termodinamica, elettromagnetismo, fisica moderna ecc.) si danno appuntamento quotidianamente perché ogni nostra azione domestica, anche la più semplice, è un esperimento di fisica. E proprio su queste semplici azioni vogliamo puntare la nostra attenzione, per capire la fisica che vi si nasconde.

In questo libro, quindi, non parleremo della cosiddetta *big science*, di fisica estrema, di acceleratori di particelle o di sonde interplanetarie, ma della scienza di tutti i giorni, di quella che possiamo definire come "fisica

del quotidiano”. Nel nostro cammino capiterà certamente di accennare alla fisica dell’infinitamente grande o a quella dell’infinitamente piccolo, ma gran parte del nostro percorso si svilupperà realmente nell’ambito delle mura domestiche, negli ambienti a noi familiari, come la cucina, il bagno o la camera da letto, attingendo esempi dall’esperienza quotidiana.

Come è fatto questo libro

Per questo motivo il testo è suddiviso in cinque capitoli, ognuno dedicato a una stanza della nostra casa. In questo percorso i protagonisti saranno i lettori, chiamati, come veri ricercatori, ad analizzare nelle loro case le esperienze che di volta in volta descriveremo, per scoprire o riscoprire leggi e fenomeni della fisica. Ma, a differenza del ricercatore che opera in laboratorio, con attrezzature specifiche e in condizioni controllate, il lettore avrà a che fare con le attrezzature domestiche. Si tratterà di utensili, stoviglie, apparecchiature meccaniche, elettriche ed elettroniche che popolano le nostre case e che vengono usate per lo scopo per le quali sono state progettate: il coltello per tagliare, il termosifone per riscaldare, la radio per ricevere e così via.

Insomma, parafrasando il titolo di un programma televisivo della seconda metà degli anni Settanta del Novecento (*Odeon. Tutto quanto fa spettacolo*) potremmo dire che qui tutta la casa fa spettacolo, perché davvero ogni angolo delle nostre mura domestiche racchiude occasioni per porsi mille domande e alimentare la nostra curiosità scientifica e tecnologica. E un’attenzione particolare è proprio rivolta all’approfondimento degli aspetti tecnologici del nostro vivere quotidiano. Infatti, siamo abituati a considerare i computer, i lettori di mp3 o i telefoni cellulari come “scatole nere” che funzionano perché devono funzionare, senza pensare alla ricerca che sta dietro alla progettazione e alla produzione di un’apparecchiatura elettronica apparentemente così semplice da usare, ma in realtà profondamente complessa da realizzare.

Ecco, in questo libro vorremmo anche rendere un po’ di giustizia a tutti gli scienziati (fisici, ma anche matematici, chimici, ingegneri) che, con il

loro lavoro quotidiano, hanno permesso a tutti noi di vivere in un mondo dove è possibile ascoltare musica passeggiando in un bosco e dove possiamo videochiamare per vedere i nostri figli distanti migliaia di kilometri. La tecnologia, a nostro giudizio, è cosa ben diversa dal “mostro” che si mangia le nostre vite, fatte di alienazione e solitudine. Non crediamo proprio che frigorifero, lavatrice, televisione, computer o telefono cellulare abbiano provocato danni alle nostre esistenze. Al contrario, pensiamo che tutti questi manufatti e le tecnologie impiegate per realizzarli abbiano offerto e stiano offrendo all’umanità grandi opportunità di crescita e di sviluppo. Il problema, se esiste, non sta in loro, ma nell’uso più o meno accorto e consapevole che noi decidiamo di farne.

Perché questo libro è organizzato in questa strana maniera?

A questo punto qualcuno potrebbe anche chiedersi perché questo libro ha una struttura così poco ortodossa. La risposta è al tempo stesso semplice e complessa. In primo luogo, possiamo dire che il libro è fatto così perché così ci piaceva farlo, mossi dalla segreta speranza di avvicinare ad alcuni concetti basilari della fisica anche chi non se ne è mai interessato. Ci sembra infatti che un luogo familiare come la casa e tutto ciò che avviene all’interno delle sue stanze possano essere un buon punto di partenza per far conoscere ai lettori curiosi quali arcane leggi regolino lo sgocciolamento di un rubinetto che perde; o anche scoprire perché ogni volta che apriamo una finestra c’è la porta della stanza che sbatte e che questi princìpi sono gli stessi che fanno sì che gli aerei volino.

In secondo luogo, possiamo dire che a muoverci è stata anche, e soprattutto, la considerazione che di libri divulgativi con la classica struttura da trattato di fisica (divisa nei consueti capitoli della meccanica, della termodinamica, dell’acustica, dell’ottica, dell’elettromagnetismo e della fisica moderna e, volendo, anche dell’astrofisica e della cosmologia) ce ne sono già molti in commercio, e perciò volevamo, nel nostro piccolo, portare una leggera ventata di originalità. La differenza sostanziale tra questi testi e il nostro è il ruolo del lettore: da quello di studioso passivo di

una disciplina già strutturata e classificata a quello di un vero e proprio ricercatore, armato di curiosità, intelligenza, capacità di ragionamento e volontà di comprendere il mondo che lo circonda.

Partendo dall'osservazione di un fenomeno il lettore è guidato a comprenderne le leggi che lo regolano e quindi a classificarlo. Il lettore scoprirà così che ogni stanza della casa è un laboratorio completo di fisica. In ogni ambiente, infatti, si mettono quotidianamente alla prova leggi della meccanica e dell'elettromagnetismo, dell'acustica e dell'ottica, della termodinamica e della meccanica quantistica. Per questo motivo nelle pagine di questo libro troverete anche qualche ripetizione: vi permetterà di collegare fenomeni o strumenti apparentemente distanti fra loro, come possono essere, per esempio, un forno a microonde e un telefono cellulare.

Da queste considerazioni si comprende anche che la nostra scelta di fenomeni da descrivere a seconda dell'ambiente domestico in cui ci troviamo è in qualche modo arbitraria (oltre che, naturalmente, non esaustiva). Ma una scelta andava comunque fatta. E ci pareva più ovvio e naturale parlare di idraulica trovandoci in bagno che non in cucina, oppure di acustica trovandoci in soggiorno piuttosto che in camera da letto. Il risultato comunque non cambia: l'impianto stereo, qualunque sia la sua collocazione all'interno della vostra casa, funzionerà sempre alla stessa maniera. E se per caso avete deciso di mettere una vasca a idromassaggio in camera da letto, be', beati voi che ve lo potete permettere.

Bene, ma come si legge questo libro?

Un modo è quello tradizionale: dalla prima all'ultima pagina, senza saltarne nemmeno una. Ma ce n'è anche un altro, forse più adatto a questi tempi in cui tutto scorre rapido e veloce. Lo sciacquone del vostro bagno non funziona bene? Correte al capitolo due, nel bagno-laboratorio. Lì troverete descritto che cos'è un sifone e qual è il suo – semplice, ma efficace – meccanismo di funzionamento. Il coltello non taglia come dovrebbe? Il capitolo sulla cucina-laboratorio è il primo, subito dopo queste pagine: vi si consiglia non solo di affilarlo, ma vi si spiega anche

perché il mestiere dell'arrotino non morirà mai. L'impianto hi-fi non produce suoni così belli come quelli che avevate ascoltato nel negozio prima di acquistarlo? Con ogni probabilità è un problema di acustica della stanza. Consultate il capitolo quattro, quello sul soggiorno-laboratorio, e troverete qualche dritta su come disporre i cinque diffusori e il subwoofer dell'home theatre appena installato in salotto.

Insomma, la nostra speranza è che questo libro non venga subito abbandonato in uno scaffale (sperabilmente dopo essere stato letto!), ma che piuttosto diventi uno strumento di consultazione. In effetti ci piace immaginare questo testo con la copertina piegata e le pagine consumate dall'uso, tenuto sempre a portata di mano, magari considerato come il "manuale di istruzioni" della vostra casa-laboratorio. Se così fosse, avremmo raggiunto il nostro scopo. E se talvolta non troverete descritto il fenomeno che tanto vi incuriosiva, ci auguriamo che non ve la prendiate troppo con noi: può capitare. Dopo tutto, nello spazio limitato di una pubblicazione come questa, non si può immaginare di comprendere tutto lo scibile umano sulla scienza e la tecnologia della vostra casa. Sappiate comunque che non l'abbiamo fatto apposta.

I
La fisica in cucina

Di coltelli che non tagliano, di forni a microonde e altre amenità

Non c'è posto al mondo che io ami più della cucina.
BANANA YOSHIMOTO

Benvenuti in cucina, un laboratorio di fisica a nostra disposizione che forse non sapevamo di avere. Questo, infatti, è il regno di posate, stoviglie ed elettrodomestici, strumenti con i quali possiamo sperimentare e verificare la validità (in maniera qualitativa) di moltissime leggi della fisica.

Allora non perdiamo tempo, e andiamo subito a vedere le leggi della natura all'opera nella nostra cucina.

COME TAGLIA UN COLTELLO

Quante volte vi siete trovati in crisi per colpa di un coltello poco affilato? Chissà quanti di voi, davanti a un bel pezzo di bistecca fumante sul piatto che aspettava solo di essere addentato, si sono sentiti frustrati trovandosi incapaci di tagliarne anche un solo boccone! Ma problemi simili si possono essere incontrati anche pelando le patate, affettando un pomodoro o semplicemente tentando di tagliare una fetta di pane. Eppure i coltelli sono strumenti molto semplici. Essenzialmente sono dei cunei che sfruttano il vantaggio meccanico di convertire piccole forze di spinta longitudinale (pressione) in grandi forze laterali, ovvero di separazione.

In altre parole, la forma della lama – molto stretta dal lato del filo, molto più larga verso il dorso – è tale che, mentre noi spingiamo anche solo

leggermente verso il basso nell'azione di tagliare, questa produce sui due lati del materiale sottoposto al taglio intense forze orizzontali: sono proprio queste forze che permettono la separazione in due pezzi del corpo che si sta tagliando.

Il trucco per un buon taglio sta tutto nel filo della lama: più è sottile, meglio è. Affilare significa infatti letteralmente *fare il filo* alla lama. Il motivo è presto detto. Quello che serve per usare con efficacia un coltello, non è tanto la forza che si esercita per affondarlo, quanto la pressione risultante sul corpo da tagliare, ovvero il valore della forza per unità di superficie del corpo. E la pressione è tanto maggiore quanto minore è la superficie su cui la forza si distribuisce.

Se il filo è fatto bene, lo spessore della lama è davvero molto sottile (si può arrivare anche a pochi millesimi di millimetro), così che la superficie totale che poggia sul materiale è ridottissima. In queste condizioni, la pressione risultante è notevole anche se la forza applicata non è particolarmente intensa e il taglio è netto, preciso e ottenuto senza fatica (quando la lama è affilata, alcuni materiali si tagliano addirittura di colpo, con un movimento secco, senza che occorra segarli). Ma basta che il filo della lama si stondi un po' perché si perda gran parte dell'efficacia di un coltello: la forza applicata si distribuisce su una superficie maggiore (decine o centinaia di volte più grande di quando il filo della lama è appena fatto) quindi è meno concentrata e perciò meno efficace.

È l'esperienza tipica (e assai frustrante!) che si fa quando, per distrazione, si cerca di tagliare con il dorso della lama invece che con il filo: lo spessore del dorso della lama, seppure non grandissimo (una lama, per poter essere ben affilata e svolgere efficacemente la sua funzione di "cuneo", non può in ogni caso essere troppo spessa), è comunque maggiore di quello del filo.

Ecco anche perché è molto più facile pungersi con la punta di un ago, piuttosto che con la sua cruna! Basta una spinta piccolissima perché l'ago si infili nella nostra pelle: la pressione sulla punta, infatti, è molto alta, proprio in virtù del fatto che la superficie della punta stessa è

estremamente ridotta.

Il principio contrario a quello su cui si basa il funzionamento di un coltello lo si può osservare, invece, nel cammello e in un qualsiasi mezzo cingolato, come un trattore o un carro armato.

Il cammello non affonda nella sabbia delle dune del deserto nella quale percorre centinaia di kilometri grazie alle piante larghe delle sue zampe: pianta larga corrisponde infatti ad area grande, e quindi a una minore pressione esercitata dal cammello sul terreno. Il peso del cammello – che è appunto la forza applicata – si distribuisce su una superficie maggiore: l'animale in questo modo può camminare "galleggiando" sulla sabbia. Questo invece non accade a chi si avventura su una spiaggia o sull'asfalto appena colato con un paio di scarpe dotate di tacchi a spillo!

Per carri armati e trattori vale lo stesso ragionamento appena fatto per il cammello. I cingoli distribuiscono il peso notevole del mezzo su una superficie molto estesa in modo tale da esercitare sul suolo una pressione relativamente limitata e impedire così che il mezzo stesso affondi nella sabbia o nel fango.

Sfruttando questa importante differenza fra peso e pressione, nel caso in cui ci si trovi a dover attraversare un fiume o un lago ghiacciato senza sapere se lo spessore del ghiaccio è tale da sopportare il nostro peso, ci possiamo sempre mettere a carponi e distribuire il peso del corpo (che ovviamente rimane sempre lo stesso qualunque posizione assumiamo) su una superficie maggiore di quella dei nostri piedi. Camminando a "quattro zampe", facciamo sì che ogni elemento di superficie del lastrone di ghiaccio sotto di noi sopporti un carico ridotto e possa quindi resistere al nostro passaggio. Il risultato non è garantito, ma il rischio di finire nell'acqua gelida è senz'altro minore!

Chiudiamo questa parte tornando per un attimo ai coltelli da cui siamo partiti.

È esperienza comune che alcune lame rimangono affilate per moltissimo tempo, mentre altre perdono il filo molto rapidamente. Naturalmente questo dipende soprattutto dal materiale di cui è composta la lama stessa.

Questo di solito è acciaio, ovvero una lega di carbonio e ferro, in cui la presenza di carbonio non deve superare il 2,1 per cento del peso. Quando il carbonio è presente in percentuale molto ridotta o praticamente assente, si parla invece di *ferro battuto*, che in pratica è ferro con alcune impurità (ed è usato quasi esclusivamente per lavorazioni artigianali, proprio per la sua tenerezza). Se, al contrario, il carbonio supera quel 2,1 per cento di peso, la lega ferro-carbonio prende il nome di *ghisa* (di cui possono essere fatte alcune pentole della vostra cucina).

All'aumentare del carbonio in percentuale sul ferro, il materiale ottenuto è più duro, ma anche meno duttile, più fragile e più difficile da saldare.

Come tutti sanno, il ferro ha la tendenza ad arrugginirsi (la ruggine è il risultato del processo di ossidazione del ferro che, esposto all'acqua e all'aria, si combina con le molecole di ossigeno, acquisendo il tipico colore rossastro). Proprio per ovviare a questo inconveniente, è stato inventato l'acciaio inossidabile, così chiamato perché resistente all'ossidazione. Per rendere inossidabile l'acciaio, occorre aggiungere alla lega ferro-carbonio anche una discreta percentuale di cromo (almeno il 10 per cento in peso, spesso combinata anche con il nichel). Solo così i nostri coltelli lucidi e splendenti possono resistere alla corrosione e rimanere integri.

Ma ricordate che, come cantava alla fine degli anni Settanta il mitico cantautore canadese Neil Young, *Rust never sleeps*, ovvero: la ruggine non dorme mai!

Le leve: schiaccianoci, forbici e apribottiglie

Adesso entriamo nel variegato mondo delle leve, strumenti così utili e importanti da far pronunciare ad Archimede la storica frase: «Datemi una leva abbastanza lunga e un punto d'appoggio e vi solleverò il mondo!».

Che questa frase sia stata veramente detta dallo scienziato siracusano vissuto nel III secolo a.C. poco importa in questo contesto. Quello che a noi interessa è la scoperta che è possibile muovere grandi pesi con

pochissimo sforzo a patto di avere una leva (un'asta, un sostegno) di una certa lunghezza e rigidità e, fondamentale, un punto di appoggio.

Ma come funziona una leva, sicuramente la prima macchina semplice mai usata dall'uomo (la scoperta della leva precede di gran lunga quella della ruota)? Per comprenderlo, partiamo con un esempio noto a tutti sin da bambini: l'altalena basculante. Questa è formata da una trave, a ciascuna delle cui estremità (chiamate *bracci*, in fisica) si siede un bambino, e al cui centro si trova il punto d'appoggio (che in fisica prende il nome di *fulcro*). Il fulcro è l'unico punto dell'altalena che rimane fermo quando i bambini iniziano a dondolare.

Quando una forza viene applicata a una certa distanza dall'asse di rotazione di un corpo (che, nell'altalena, passa proprio per il fulcro), si dice che essa produce un *momento*: questo è, appunto, l'azione necessaria a mettere in rotazione il corpo stesso. In pratica, sono proprio i momenti delle forze a generare i moti rotazionali.

Ora, nel caso dell'altalena, siamo proprio in presenza di due momenti contrapposti: quello dato dal peso del primo bambino che farebbe ruotare l'altalena in un verso, e quello dato dal peso dell'altro bambino che, invece, farebbe ruotare l'altalena nel verso contrario.

Poiché nel caso semplice dell'altalena i momenti delle forze-peso sono uguali al prodotto del peso del bambino (forza applicata) per la distanza che questo ha dal fulcro (braccio della forza), perché i due momenti siano sostanzialmente bilanciati, e quindi l'altalena possa dondolare senza sforzo, occorre che sia verificata la condizione:

(peso bambino 1) x (braccio 1) = (peso bambino 2) x (braccio 2)

ovvero che bambini di peso simile siano equidistanti dal fulcro, oppure che il bambino più pesante stia più vicino al fulcro in maniera tale da ridurre il braccio della forza data dal suo peso. In tutti gli altri casi, a meno di spinte ulteriori, l'altalena è condannata a stare con un'estremità in basso (quella dove il momento è maggiore) e un'estremità in alto.

Sul principio di funzionamento della leva si basa anche la stadera,

particolare bilancia di origine romana dove il peso della merce posta sul piatto viene determinato proprio bilanciandone il momento, ovvero spostando il peso scorrevole lungo il braccio graduato fino a che i due momenti non sono uguali. A quel punto, sul braccio graduato – appositamente tarato – si può leggere effettivamente il peso reale della merce.

Si comprende l'entusiasmo di Archimede. Un peso di 10 kg posto a 1 m di distanza dal fulcro di una leva può facilmente venire sollevato da una forza di 1 kg (applicata per esempio da una mano che spinge verso il basso), a patto che questa abbia un braccio di 10 m.

E proseguendo idealmente questo esempio, applicando sempre la stessa forza di 1 kg è possibile alzare un quintale o una tonnellata, a patto di avere bracci 100 o 1000 volte maggiori (ecco le leve lunghe di Archimede!) e l'opportuno e fondamentale punto d'appoggio.

Bene, ma che cosa c'entrano le altalene con forbici, schiaccianoci e apribottiglie? Basta non lasciarsi ingannare dall'apparenza e la risposta diventa ovvia: anche forbici, schiaccianoci e apribottiglie sono delle leve. Tutti questi utensili si basano sul principio appena enunciato.

Posta infatti la questione in termini più generali, in una leva semplice abbiamo sempre a che fare con una *forza applicata* P con la quale vogliamo vincere una *forza di resistenza* R.

La leva permette di risolvere il problema applicando un forza P anche minore di R, in misura tale che il rapporto P/R è uguale all'inverso del rapporto fra i bracci delle due forze. In termini matematici:

$$(\text{forza P})/(\text{forza R}) = (\text{braccio di R})/(\text{braccio di P})$$

In pratica, è proprio il rapporto tra le dimensioni dei bracci a determinare il rapporto fra la forza resistiva e la forza da applicare. In termini di progettazione, è sufficiente costruire le leve così da avere sempre un vantaggio meccanico tale da dover applicare il minor sforzo possibile.

Proprio in base al valore del rapporto fra forza resistiva e forza applicata le leve si classificano in:

1) *vantaggiose*, quando la forza da applicare è minore di quella resistiva, ovvero quando il braccio di quest'ultima è più corto del braccio della forza applicata;
2) *svantaggiose*, quando la forza da applicare è maggiore di quella resistiva, ovvero quando il braccio di quest'ultima è più lungo del braccio della forza applicata;
3) *indifferenti*, quando la forza da applicare è uguale a quella resistiva, ovvero quando i due bracci sono di identica lunghezza.

Oltre a questo tipo di classificazione, le leve possono essere suddivise anche per tipo, a seconda della posizione reciproca del fulcro e delle forze in gioco. Così abbiamo *leve di primo genere*, quando il fulcro si trova fra le due forze (come nel caso dell'altalena), *leve di secondo genere*, quando è la forza di resistenza a trovarsi fra il fulcro e la forza applicata, e, infine, *leve di terzo genere*, quando è invece la forza applicata a trovarsi fra il fulcro e la forza di resistenza. È immediato capire che le leve di primo genere possono essere vantaggiose, svantaggiose e indifferenti, quelle di secondo genere sono sempre vantaggiose, mentre quelle di terzo genere sono sempre svantaggiose.

Adesso che ci siamo fatti un'idea generale sulle leve andiamo a scoprire con quali tipi di leve abbiamo a che fare in cucina.

Prendiamo per esempio le forbici: il fulcro sta ovviamente nella cerniera (il punto in cui sono avvitate le due parti che compongono le forbici), la forza resistiva è data dal materiale da tagliare, mentre quella applicata è data dall'impugnatura.

Le forbici sono quindi leve di primo genere. Ma sono vantaggiose o no? Naturalmente questo dipende dal rapporto fra le lunghezze dei bracci. Allora, tenendo conto che il braccio della forza applicata è fissato (è la distanza fra la cerniera e l'impugnatura), perché le forbici siano una leva vantaggiosa occorre far sì che il punto di contatto delle lame con il materiale da tagliare sia il più vicino possibile alla cerniera.

Ricordatevelo la prossima volta che usate le forbici per tagliare un pezzo di cartone e state facendo una fatica immane… ma non dimenticatevi di

affilare periodicamente le lame!

Analizziamo ora lo schiaccianoci. Il fulcro si trova nel perno all'estremità dell'utensile, la forza resistiva è data dal guscio della noce, la forza applicata è data dalla nostra impugnatura. È evidente che nel caso dello schiaccianoci ci troviamo davanti a una leva di secondo genere (e quindi vantaggiosa), dove il braccio della forza resistiva è nettamente più corto del braccio di quella applicata: ecco perché rompere una noce è (quasi) sempre un gioco da ragazzi.

Infine gli apribottiglie. Ne esistono di tanti tipi e forme diverse, ma tutti, proprio tutti (anche il cavatappi, quello con la punta a succhiello che si usa per togliere i turaccioli) sono leve, tipicamente di primo o di secondo genere.

Leva di primo genere è l'apribottiglie che a un'estremità si aggancia sotto il bordo del tappo a corona e in cui il fulcro si appoggia sopra il tappo stesso. Con il braccio della forza applicata – ancora una volta data dalla nostra impugnatura che spinge verso il basso – molto più lungo dell'altro, diventa facile anche piegare un pezzo di metallo resistente come quello di cui è fatto un tappo a corona.

Leva di secondo genere – e quindi ancora vantaggiosa – è invece l'apribottiglie con l'apertura ovale, ovvero quello che si usa spingendo verso l'alto: anche qui il fulcro è sopra il tappo, ma la forza resistiva è sulla linguetta metallica appoggiata sotto il bordo della corona.

E chi mai potrebbe pensare di usare leve svantaggiose, come quelle di terzo genere?

Sembra impossibile, ma ci ha pensato la natura: alcune sono addirittura nel nostro corpo.

Un esempio? Le braccia: il fulcro è nel gomito, la forza resistiva è data dal peso dell'avambraccio e della mano, la forza applicata è data dai muscoli del braccio, i cui tendini si agganciano vicinissimi all'articolazione del gomito. Leva svantaggiosa, dunque, ma estremamente funzionale.

Cucinare con la pentola a pressione

Avrete sicuramente sentito dire o avrete fatto esperienza diretta del fatto che cucinare un uovo sodo o un piatto di spaghetti in alta montagna richiede più tempo di quanto ne serva quando si cucinano questi stessi alimenti al livello del mare o comunque a bassa quota. Il motivo è legato al fatto che la temperatura di ebollizione dell'acqua, nella quale si immergono l'uovo o gli spaghetti, dipende dalla pressione atmosferica; e questa diminuisce molto rapidamente all'aumentare dell'altitudine. Così, l'acqua, che bolle a 100 °C alla pressione di un'atmosfera (valore medio di pressione che si trova al livello del mare), a un'altitudine di 3000 m bolle a una temperatura di 10 °C inferiore a quel valore, ovvero ad appena 90 °C. Ecco perché i cinque minuti necessari per rassodare un uovo al mare diventano molti di più in montagna: ad alta quota l'uovo è immerso in acqua a temperatura inferiore!

Per ovviare a questo inconveniente, ma anche per cucinare più rapidamente al livello del mare, esiste la pentola a pressione, utensile da cucina inventato dal fisico francese Denis Papin (1647-1712), autore di importanti studi pionieristici sulle macchine a vapore. Anzi, fu proprio la valvola di sicurezza, progettata da Papin per evitare che la pentola esplodesse per l'eccesso della pressione interna raggiunta dal vapore, a ispirare successivamente il motore a vapore con pistone e cilindro.

Il principio di funzionamento della pentola a pressione è molto semplice. Poiché, come abbiamo appena visto, la temperatura di ebollizione dell'acqua dipende dalla pressione della colonna d'aria che la sovrasta, aumentando questa pressione si può innalzare il punto di ebollizione, portando l'acqua a temperature più alte prima che questa inizi a bollire.

D'altra parte, durante l'ebollizione l'acqua rimane a temperatura costante (è possibile verificare questa condizione semplicemente immergendo un termometro da cucina nell'acqua in ebollizione: qualunque sia la potenza della fiamma, vedrete che l'acqua resterà fissa alla temperatura raggiunta al momento in cui ha iniziato a bollire!): diventa quindi possibile cuocere

gli alimenti a temperature più alte, riducendo così i tempi di cottura.

Nelle pentole a pressione moderne, dove la pressione può raggiungere valori doppi di quella atmosferica, l'acqua arriva all'ebollizione alla temperatura di circa 120 °C (in alcuni modelli si raggiungono temperature anche maggiori). Ad aumentare la pressione interna, naturalmente, è il vapore d'acqua che va a saturare la parte superiore della pentola, che deve essere chiusa ermeticamente. Bloccando completamente (a parte la via di fuga della valvola di sicurezza) la fuoriuscita di aria e, soprattutto, di vapore, l'acqua che evapora durante il riscaldamento e l'aria disciolta in essa non possono disperdersi, e una maggiore quantità di aria e di vapore resta costretta in un volume costante e limitato.

È proprio questo fatto, ovvero l'aumento delle molecole di aria e di vapore acqueo nel volume compreso fra il pelo dell'acqua e il coperchio, a causare l'aumento della pressione richiesto: a parità di volume, infatti, maggiore è la quantità di aria, maggiore è la pressione. (Nelle normali pentole, il coperchio tradizionale riduce sicuramente le perdite di calore dovute alla dispersione in aria del vapore che si alza dalla superficie dell'acqua in ebollizione, ma non permette di elevare significativamente la pressione, né quindi di innalzare la temperatura dell'acqua.)

Una pentola a pressione, però, si può trasformare anche in un'arma pericolosissima. Ecco perché tutti i libretti di istruzioni si premurano di avvertire di usare questo utensile con estrema cautela, facendo attenzione, in particolare, allo stato della valvola di sicurezza, il cui buon funzionamento impedisce alla pentola di diventare una bomba a vapore e di esplodere violentemente.

La valvola di sicurezza, generalmente regolabile, permette infatti di evitare che il vapore raggiunga pressioni e quindi temperature troppo alte, lasciando libero di uscire dalla pentola il vapore acqueo che si forma in eccesso rispetto alla pressione desiderata. Se però la valvola è per qualche motivo bloccata o ostruita, la pressione all'interno della pentola aumenta in maniera considerevole, potendo anche arrivare a sbloccare violentemente il coperchio, con conseguenze disastrose per gli oggetti (e,

purtroppo, le persone) circostanti.

Le valvole di sicurezza, note anche con il nome di valvole limitatrici di pressione, proprio per la loro specifica funzione, non sono presenti esclusivamente nelle pentole a pressione, ma in molti altri impianti e dispositivi che hanno bisogno di un controllo della loro pressione interna. Impianti idraulici, caldaie, macchine e motori a vapore rappresentano alcuni esempi tipici di impiego delle valvole di sicurezza, il cui meccanismo di funzionamento è tanto semplice quanto efficace. Tipicamente, infatti, esse sono costituite da un'apertura che in condizioni normali è mantenuta chiusa da una molla.

Se però la pressione del vapore si alza oltre il livello stabilito, questo spinge con una forza superiore alla forza elastica della molla che perciò viene compressa e apre la valvola lasciando uscire vapore fino a quando, all'interno, non si ristabilisce nuovamente una pressione tale da permettere alla valvola di richiudersi, richiamata dalla forza elastica della molla. La regolazione della pressione si ottiene proprio agendo adeguatamente sulla molla, ovvero costringendola a una maggiore o minore compressione.

La macchina per il caffè

Se pensiamo alla bevanda più popolare in Italia ci viene subito in mente il caffè e, di conseguenza, se dobbiamo dire quale sia l'utensile da cucina più diffuso, il pensiero vola alla moka, la caffettiera ideata da Alfonso Bialetti nel 1933 e di cui è facile ipotizzare che esista almeno un esemplare in ogni casa italiana (ma in molte se ne trovano anche due o tre, di diverse dimensioni).

La moka è essenzialmente costituita da tre parti: la base (o caldaia), in cui si mette l'acqua e che ha la funzione di bollitore (come la pentola a pressione, anche la base della moka è dotata di valvola di sicurezza); la parte centrale, costituita da un filtro metallico cilindrico, adibito a raccogliere la polvere di caffè macinato, e da un imbuto, anch'esso di metallo, che pesca quasi al fondo dell'acqua della base; la parte superiore

(o raccoglitore), dove si raccoglie il caffè al termine del processo di filtrazione. A garantire la tenuta fra la parte superiore e quella inferiore che si avvitano l'una nell'altra, è una guarnizione di gomma, dal cui stato di salute può dipendere parte del successo nella preparazione del caffè: se la gomma è invecchiata, infatti, è troppo rigida e parte dell'acqua esce dalla filettatura invece di filtrare verso l'alto.

La preparazione del caffè con la moka sembra una cosa ovvia che non lascia spazio per la creatività di chi lo prepara, tuttavia è anche vero che, apparentemente a parità di tutte le condizioni di base (quantità d'acqua, grado di macinazione del caffè, tipo di miscela), dalla stessa moka possono talvolta uscire caffè completamente diversi: o troppo forti o troppo annacquati. E questo dipende in gran parte da come è stato riempito il filtro con la polvere di caffè macinato: poca, troppa, troppo pressata, troppo porosa. Vediamo come può accadere.

In linea di principio, il meccanismo di funzionamento delle caffettiere come la moka è piuttosto semplice da descrivere. Scaldando l'acqua nella base, questa in parte evapora. Via via che la temperatura aumenta, aumentano il tasso di evaporazione e quindi la pressione del vapore, in espansione, compreso fra il pelo dell'acqua e la parte inferiore del filtro. Perché questa pressione sia sufficiente a costringere l'acqua a risalire su per l'imbuto, per il filtro e per lo stretto tubo presente nella parte superiore da cui poi sgorgherà il caffè, occorre che sia leggermente superiore alla somma di due pressioni: quella atmosferica, ovvero il valore di pressione sopra il filtro (uguale naturalmente alla pressione esterna), e quella cosiddetta “di filtrazione”, che possiamo definire come la pressione necessaria a far passare un fluido (in questo caso l'acqua) attraverso un mezzo poroso (in questo caso la polvere di caffè macinato).

Raggiunto questo valore di pressione, il vapore acqueo inizia ad agire come una molla compressa, spingendo l'acqua in ebollizione e forzandola a risalire vincendo la forza di gravità. È in questa fase che l'acqua, attraversando il filtro, estrae gli aromi e le varie essenze dalla polvere di caffè per trasformarsi nell'agognata bevanda. Proprio l'attraversamento del

filtro è la fase più delicata del processo di preparazione del caffè: in particolare sono molto importanti la temperatura a cui si trova l'acqua e la sua velocità di salita, da cui dipende il tempo impiegato per percorrere lo spessore del filtro. Da questi fattori dipende il risultato finale della preparazione. In gioco, infatti, c'è il processo di filtrazione, che ha le sue leggi da rispettare.

Il primo a studiare la filtrazione fu l'ingegnere idraulico francese Henry Philibert Gaspard Darcy (1803-1858) che arrivò a formulare una legge empirica su questo processo osservando il passaggio dell'acqua attraverso tubi riempiti da diversi strati di sabbia.

La legge della filtrazione lineare, oggi nota come *legge di Darcy*, in onore appunto del suo scopritore, mette in relazione la quantità di fluido che passa in un certo intervallo di tempo attraverso un filtro di dimensioni date con la differenza di pressione che si trova alle due estremità del filtro stesso. In questa legge fanno la loro comparsa caratteristiche fisiche proprie del fluido (densità e viscosità dell'acqua), ma anche una grandezza, detta *coefficiente di filtrazione*, che dipende esclusivamente dal mezzo poroso.

Applicando la legge di Darcy – che trova largo e fondamentale impiego in geologia, nello studio della permeabilità dei diversi tipi di terreno – al nostro caffè in preparazione, si trova che, in condizioni normali, la temperatura di ebollizione dell'acqua all'interno della moka è di alcuni gradi sopra i 100 °C (valori tipici sono compresi fra 105 e 110 °C).

Sempre con la legge di Darcy, che è di natura fenomenologica, si scopre che coefficienti di filtrazione lineare tipici per le polveri di caffè sono in genere molto vicini a quelli della sabbia pulita e non eccessivamente fine (come, per esempio, una miscela di sabbia e ghiaia). La polvere di caffè ha pertanto un comportamento simile a quello dei cosiddetti *terreni a grana grossa*. Per confronto, terreni a grana fine, come il limo e l'argilla, hanno permeabilità da 1000 a un milione di volte più piccole. L'argilla, in particolare, ha una permeabilità talmente piccola che è un terreno considerato impermeabile.

L'ipotesi fondamentale perché la legge di Darcy sia valida è che la filtrazione sia lineare, ovvero che il fluido si muova attraverso i piccoli tubi capillari del mezzo poroso in maniera laminare (in cui strati contigui hanno velocità simili) e non turbolenta, dove invece zone adiacenti del fluido possono avere velocità anche molto diverse fra loro. Un mezzo poroso, infatti, può essere considerato come composto da una quantità innumerevole di capillari più o meno tortuosi e interconnessi, all'interno dei quali può scorrere il fluido.

Se il flusso è laminare, è sufficiente un certo valore di pressione, ma se il flusso diventa turbolento, si verifica la formazione di vortici al suo interno. In condizioni vorticose, però, ovvero in presenza di fenomeni dissipativi, per mantenere costante il flusso attraverso il filtro, è necessaria una pressione maggiore, quindi un aumento della temperatura. Ora, se la nostra polvere di caffè è troppo pressata, ci troviamo proprio in queste condizioni: la struttura dei capillari può mostrare brusche interruzioni che causano moti vorticosi. Ma può anche arrivare a impedire il passaggio dell'acqua, con conseguente innalzamento della temperatura e della pressione del vapore. Fortunatamente c'è sempre la valvola di sicurezza a impedire che la moka esploda (ma fate sempre attenzione che non sia otturata!), ma il caffè bruciato è il minimo che vi possa toccare.

Se, viceversa, la polvere è poco pressata, non correte sicuramente alcun rischio di esplosioni, ma il caffè risultante sarà un po' leggero, a causa dell'eccessiva facilità con cui l'acqua potrà filtrare attraverso il filtro, anche a pressioni di poco superiori a quella atmosferica. Quindi, a parità di condizioni, a far sì che un caffè sia buono o cattivo è semplicemente la mano del preparatore, la cui maggiore o minore pesantezza condiziona in maniera drammatica la forma dei capillari nel mezzo poroso e il conseguente processo di filtrazione.

Cucinare con il forno a microonde

Ormai molte famiglie hanno un forno a microonde in cucina.

Comodissimo, permette di cucinare in pochi minuti piatti che altrimenti richiederebbero molto più tempo, oppure di scongelare rapidamente gli alimenti che ci siamo dimenticati nel congelatore la mattina, uscendo di fretta da casa per andare al lavoro. Nonostante l'apparente semplicità d'impiego, in realtà il forno a microonde è un concentrato di tecnologia, il cui funzionamento è legato a un interessante e complesso capitolo della fisica applicata.

Onda su onda

Le microonde sono onde elettromagnetiche, né più né meno come quelle della luce che ci arriva dal Sole o delle onde radio che, arrivando sull'antenna che abbiamo sul tetto, ci permettono di guardare le nostre trasmissioni televisive preferite.

Onde elettromagnetiche sono anche i raggi X ai quali ogni tanto ci sottoponiamo per vedere lo stato dei nostri organi interni, o i raggi ultravioletti, di cui tanto abbiamo paura in estate, soprattutto da quando sopra le nostre teste incombe il famigerato buco dell'ozono (che in realtà non è sopra le nostre teste, ma sopra i ghiacci dell'Antartide e, in misura minore, dell'Artide).

La differenza sostanziale fra queste onde dall'apparenza e dagli effetti così diversi sta tutta in quella che si chiama *lunghezza d'onda*, una grandezza caratteristica di qualunque fenomeno ondulatorio. La lunghezza d'onda si definisce infatti come la distanza fra due *creste* (i punti più alti di un'onda) successive, o anche fra due *valli* (i punti più bassi) successive. Anche le onde del mare hanno una lunghezza d'onda: ci sono quelle ravvicinate, a breve lunghezza d'onda, ma ci sono anche quelle molto distanti le une dalle altre, come quelle, ricercatissime, ambite dai surfisti, o quelle, temutissime, dei maremoti.

Così, anche le onde elettromagnetiche possono avere lunghezze d'onda cortissime, come i raggi X e quelli ultravioletti, o lunghissime, come le onde radio. Per non rimanere nel vago, diamo un po' di numeri, ovvero di lunghezze. Le onde radio, per esempio, vanno dal millimetro alle decine di

migliaia di kilometri, ma il confine superiore è infinito.

La luce o, meglio, la radiazione visibile, così chiamata perché a essa sono sensibili le cellule presenti nella retina dell'occhio umano, ha lunghezza d'onda minore, andando da 350 a 700 milionesimi di millimetro, passando dal colore violetto al rosso. I raggi X hanno lunghezze d'onda ancora minori che si trovano nell'intervallo compreso fra 10 milionesimi di millimetro e un millesimo di milionesimo di millimetro.

Scendendo ancora lungo lo spettro verso le lunghezze d'onda più corte in assoluto troviamo i raggi gamma, la radiazione più energetica dell'intero spettro elettromagnetico. Infatti, per le onde elettromagnetiche vale la relazione che minore è la loro lunghezza d'onda, maggiore è l'energia che portano.

Quando si muovono nel vuoto, le onde elettromagnetiche hanno la caratteristica fondamentale di muoversi tutte alla stessa velocità, chiamata *velocità della luce* (perché venne misurata per la prima volta per la radiazione visibile; solo in seguito si capì che questa costituiva solo una piccolissima parte dello spettro delle onde elettromagnetiche). Il simbolo universalmente riconosciuto per la velocità della luce è la lettera "c" minuscola, che è l'iniziale della parola latina *celeritas*, ovvero velocità. In pratica, i fisici riconoscono che quella della luce è la velocità per eccellenza.

Anche perché, come venne dimostrato da Albert Einstein nella sua teoria della relatività ristretta, la velocità della luce è un limite fisico invalicabile: nessun corpo materiale, seppure accelerato indefinitamente, potrà mai raggiungere e superare questa velocità che è esattamente di 299792458 metri al secondo, ovvero circa 300.000 km al secondo. Altissima, certo, ma non infinita.

Frequenza e periodo di un'onda

Nel trattare le onde, di qualunque natura esse siano, i fisici parlano spesso in termini non solo di lunghezza d'onda, ma anche di *frequenza*.

Questo termine, usato anche nel linguaggio comune, definisce una grandezza fisica fondamentale nella descrizione dei fenomeni periodici, come appunto sono i moti ondosi, che si ripetono ciclicamente dopo un certo periodo di tempo.

Per un'onda elettromagnetica, quindi, la frequenza è una misura del numero di cicli compiuti da un'onda nell'unità di tempo. In altre parole, fissata un'unità di tempo, per esempio di un secondo, si va a contare quante creste (o valli) di una certa onda passano da un determinato punto dello spazio: il numero ottenuto, diviso per l'unità di tempo, è la frequenza di quell'onda.

In maniera equivalente, si può misurare il cosiddetto *periodo*, ovvero quanto tempo intercorre fra due creste successive, e calcolarne l'inverso (in matematica si definisce inverso di un numero x il risultato ottenuto dividendo 1 per quel numero: $1/x$): otterremmo ugualmente la frequenza dell'onda. Quindi, fra il periodo p e la frequenza f di un'onda esiste questa importante relazione:

$$f = 1/p$$

che può essere naturalmente riscritta in forma inversa:

$$p = 1/f$$

Da cui si deduce che la frequenza ha le dimensioni dell'inverso di un tempo.

L'unità di misura della frequenza è lo hertz (simbolo Hz: 1 Hz è pari a un ciclo al secondo), dal nome del fisico tedesco Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) che per primo dimostrò sperimentalmente l'esistenza delle onde elettromagnetiche, ponendo anche le basi per l'invenzione della radio. La dimostrazione teorica, infatti, era arrivata alcuni anni prima dallo scozzese James Clerk Maxwell (1831-1879) che, nel 1864, presentò alla Royal Society di Londra le equazioni che ora prendono il nome di *equazioni di Maxwell* (pur essendo la sintesi grandiosa degli studi condotti sui fenomeni elettrici e magnetici nei decenni precedenti da molti altri

fisici), le quali prevedono l'esistenza delle onde elettromagnetiche.

FREQUENZA O LUNGHEZZA D'ONDA?

È sempre possibile passare da una descrizione di un fenomeno ondulatorio, espresso in termini di frequenze, a un'analoga descrizione in termini di lunghezze d'onda. Fra queste due grandezze esiste infatti un legame espresso dalla seguente equazione valida per qualunque moto ondoso:

frequenza = velocità dell'onda/ lunghezza dell'onda

che può essere scritta anche in forma inversa:

lunghezza d'onda = velocità dell'onda/frequenza

Da questa espressione si capisce subito che, nel caso in cui si stia parlando di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto, diventa banale passare dall'una all'altra grandezza caratteristica:

frequenza = c/lunghezza d'onda e lunghezza d'onda = c/frequenza

dove con c abbiamo indicato la velocità della luce nel vuoto.
Così, per esempio, le onde radio, che hanno lunghezze d'onda superiori al millimetro, hanno frequenze inferiori a 300 gigahertz (GHz), ovvero a trecento miliardi di cicli al secondo. Che sembrano tantissimi, ma diventano niente se confrontati anche solo con le frequenze tipiche della luce visibile, che sono 2000 volte maggiori: la radiazione di colore rosso, quella a frequenza più bassa dello spettro visibile, ad esempio, ha una frequenza di circa 450 terahertz (THz): 450 milioni di milioni di cicli al secondo!

Le microonde

Dopo questa lunga introduzione sulle onde elettromagnetiche, arriviamo alle microonde che possono essere considerate la porzione ad alta frequenza delle onde radio.

Vengono definite "microonde" quelle radiazioni elettromagnetiche che si trovano nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso fra 1 mm e 30 cm, o, analogamente, nell'intervallo di frequenze compreso fra 1 GHz e 300 GHz.

Come le onde radio, le microonde hanno moltissimi impieghi nel campo

delle trasmissioni a lunga distanza: radio, televisione, telefoni cellulari, ma anche radar (gli strumenti di rilevazione della distanza e del movimento di navi e aerei) e comunicazioni fra satelliti sono fra i campi di maggiore applicazione di questo tipo di onde. Vedremo in altri capitoli le microonde al lavoro nelle trasmissioni televisive e nella telefonia cellulare, per ora ci limitiamo a studiarne il loro impiego in un ambito di applicazione che nessuno aveva immaginato potessero avere.

La scoperta del "potere culinario" delle microonde, infatti, si deve al caso (come molte altre scoperte scientifiche e tecnologiche). Fu l'ingegnere e inventore statunitense Percy Spencer (1894-1970), che durante la seconda guerra mondiale lavorava alla produzione di radar, ad accorgersi nel 1945 che queste erano in grado di riscaldare gli alimenti. Infatti, trovandosi davanti a un radar in funzione, Spencer notò con stupore che la barretta di cacao che teneva in tasca stava fondendo. Già all'epoca detentore di 120 brevetti, Spencer intuì immediatamente che cosa era accaduto e subito si mise a sperimentare le sue supposizioni, prima con il pop corn, il primo alimento portato volontariamente a cottura, e poco dopo con un uovo (che esplose in faccia al collega che assisteva all'esperimento). Il brevetto per il processo di cottura a microonde arrivò l'anno successivo, e nel 1947, l'anno dopo ancora, venne commercializzato il primo modello di forno a microonde: un elettrodomestico alto 180 cm, pesante 340 kg, raffreddato ad acqua e con un potenza di 3000 W, circa 3 volte quella dei forni attuali.

Come funziona il forno a microonde

La parte fondamentale di un forno a microonde è il *magnetron*, un tubo a elettroni all'interno del quale queste particelle vengono accelerate per produrre le microonde (il magnetron era anche la sorgente di microonde nei radar impiegati da Spencer). I magnetron dei forni a microonde attualmente in commercio producono microonde a una frequenza tipica di 2,45 GHz (2450 MHz), ovvero a una lunghezza d'onda di 12,24 cm. Queste ultime, una volta prodotte, vengono incanalate attraverso una guida

d'onda verso la camera di cottura, dove vengono continuamente riflesse dalle pareti metalliche fino a che non sono assorbite dall'alimento posto al suo interno. In pratica, le pareti metalliche sono degli specchi per le microonde.

Questo è il motivo per cui occorre evitare l'impiego di contenitori metallici all'interno della camera di cottura: impedirebbero alle microonde di raggiungere il cibo in essi contenuto, riflettendole indietro.

Anche lo sportello anteriore, dalla cui finestra è possibile controllare il livello di cottura del cibo posto all'interno del forno, è protetto da una griglia metallica le cui maglie hanno dimensione inferiore ai 12 cm della lunghezza d'onda delle microonde presenti ed è quindi tale da impedire la trasmissione delle microonde stesse verso l'esterno: sarebbe come far passare una moneta da un foro 50 volte più piccolo della moneta stessa. D'altra parte, la radiazione visibile, che ha una lunghezza d'onda nettamente inferiore alle dimensioni dei fori della griglia, è in grado di attraversarla e di giungere ai nostri occhi. La griglia, quindi, da un lato aumenta l'efficienza del processo di cottura, perché nessuna microonda va persa, dall'altro rende sicuro il forno, impedendo che le microonde prodotte vadano a diffondersi nell'ambiente circostante… e riscaldino le barrette di cacao o le persone che si trovano intorno!

Spesso viene sollevato proprio il problema della sicurezza di questi dispositivi. Premesso che per essere messi in commercio questi forni devono rispondere ai particolari requisiti di emissione regolamentati per legge, se non vi fidate delle specifiche indicate nel manuale d'istruzioni potete sempre fare il seguente esperimento. Prendete un bicchiere d'acqua a temperatura ambiente e misuratene la temperatura con un termometro da alimenti.

Fatto questo, ponete il bicchiere davanti alla finestra del forno in funzione (mi raccomando però: non accendete mai il forno con la camera di cottura vuota perché potrebbe surriscaldarsi e andare in corto circuito), aspettate che il forno termini il suo ciclo di cottura e controllate nuovamente la temperatura dell'acqua.

Se questa è rimasta uguale, potete stare tranquilli: le microonde sono rimaste ingabbiate dalla schermatura della griglia. Se invece l'acqua nel bicchiere si è riscaldata… forse è il caso di cambiare forno!

Fatti e falsità sul microonde

In realtà, le microonde non agiscono solo sull'acqua contenuta nel cibo, ma anche su tutte le altre molecole che hanno una struttura dipolare (cioè con una carica elettrica positiva concentrata in un "polo" e una negativa concentrata nel polo opposto). Questo processo è noto come riscaldamento dielettrico. In effetti, anche alcuni grassi e zuccheri hanno caratteristiche dipolari ma in misura nettamente inferiore a quella dell'acqua: così resta l'acqua la sostanza su cui l'effetto delle microonde si manifesta con maggiore efficacia. Per questo motivo, nel forno a microonde gli alimenti ricchi d'acqua cuociono più rapidamente degli altri.
Il riscaldamento dielettrico non contamina il cibo, né lo rende radioattivo: le microonde non hanno energie tali da innescare chissà quali reazioni nucleari! È anche falsa la credenza che il forno a microonde cuocia il cibo dall'interno verso l'esterno, ossia in maniera opposta alla cottura tradizionale: le microonde riscaldano il cibo anche direttamente all'interno, ma partendo sempre dalla superficie. Inoltre non arrivano troppo in profondità nei tessuti, così che le zone interne del cibo sono cotte, in maniera molto più lenta, dal calore proveniente per conduzione dagli strati esterni.
In cambio gli aspetti positivi del forno a microonde sono molti: fra questi, la maggiore efficienza nella cottura, ovvero il fatto che riscalda più rapidamente i cibi limitandosi a scaldare solo questi, e non l'intera camera di cottura, come accade nei forni tradizionali. Senza contare il fatto che, cuocendo più rapidamente e senza aggiunta d'acqua, i cibi mantengono valori nutrizionali più elevati.
Occorre invece fare molta attenzione alla scelta dei contenitori: i materiali più usati sono vetro, carta, ceramica e plastica, perché sono trasparenti alle microonde (le microonde passano attraverso questi materiali come la luce attraverso un vetro). Essi, perciò, non sono scaldati dalle microonde, ma dal cibo che contengono; questo può raggiungere temperature molto alte che possono, per esempio, fondere alcune plastiche le cui sostanze andrebbero a contaminare il cibo. È sempre meglio usare contenitori in vetro e ceramica, resistenti alle alte temperature, e ricordarsi di estrarli dal forno a microonde con le stesse precauzioni che useremmo con un forno tradizionale: il rischio di ustioni e bruciature è sempre in agguato!

Ma che cosa succede al cibo?

Perché per la prova di schermatura abbiamo scelto proprio un bicchiere d'acqua? Perché il forno a microonde cuoce o riscalda gli alimenti agendo proprio sulle molecole d'acqua che questi contengono, generalmente, in abbondanza.

La molecola d'acqua è composta da un atomo di ossigeno e da due atomi di idrogeno; questi ultimi sono posti ai vertici della base di un triangolo isoscele mentre al vertice opposto alla base sta l'atomo di ossigeno. La molecola d'acqua ha una caratteristica fisica importante: quella di essere elettricamente polarizzata.

In pratica gli elettroni esterni della molecola, impegnati nei legami tra l'atomo di ossigeno e ciascun atomo di idrogeno, tendono a trascorrere più tempo attorno all'atomo di ossigeno che attorno a quelli di idrogeno, facendo sì che la molecola, che nel complesso è elettricamente neutra, abbia il vertice in cui si trova l'atomo di ossigeno con una frazione di carica negativa e i due vertici con l'atomo di idrogeno con una frazione di carica positiva. Si dice che la molecola d'acqua è dipolare (cioè a due poli), o che è un *dipolo* elettrico naturale.

Così, le molecole, al passaggio del campo elettromagnetico portato dalle microonde, tendono ad allinearsi al campo elettrico, il quale però oscilla ciclicamente a 2,45 GHz, costringendo le molecole d'acqua a tentare di cambiare orientamento con la stessa frequenza. In questo continuo ruotare su loro stesse per seguire l'oscillazione delle microonde, le molecole d'acqua urtano fra loro e con le altre molecole di cui è composto l'alimento, cedendo a queste ultime parte della loro energia cinetica (cioè di movimento), acquisita a spese del campo elettromagnetico.

Ma è proprio l'aumento di energia cinetica degli atomi e delle molecole, che vibrano e ruotano a maggiore velocità e frequenza rispetto a prima, a rappresentare quell'aumento di temperatura che porta dunque alla cottura dell'alimento all'interno del forno. A livello microscopico, infatti, un corpo è tanto più caldo tanto più alta è l'energia degli atomi e delle molecole che lo compongono: ecco quindi che l'energia delle microonde è andata a trasformarsi in energia interna del cibo sottoposto a cottura e in

calore che si diffonde al suo interno per conduzione (ma vedremo più avanti le modalità in cui si trasmette il calore).

L'uovo esplosivo

Il secondo tentativo di cottura di Spencer fu eseguito su un uovo che esplose drammaticamente sul volto di uno degli sperimentatori. Il motivo per cui l'uovo è un tipico cibo da non cuocere a microonde è presto detto: essendo ermeticamente chiuso, l'acqua liquida che si trova al suo interno comincia a evaporare e quindi a espandersi, aumentando la pressione interna. Poiché non trova vie di fuga, spinge sulle pareti del guscio fino a quando questo si rompe, in maniera tipicamente esplosiva (provare per credere, ma poi non fate drammi se vi tocca ripulire il forno con la candeggina: d'altra parte il lavoro dello sperimentatore è anche questo!).
Se volete comunque cimentarvi nella cottura delle uova nel vostro forno a microonde, non disperate. Da qualche tempo, infatti, esistono in commercio particolari contenitori a doppia camera, in grado di cuocere le uova a vapore senza gli inconvenienti appena visti. In pratica si tratta di un contenitore che ha una camera inferiore in plastica all'interno della quale va messa un po' d'acqua, collegata a una camera superiore da una serie di piccoli fori. Questa camera superiore, che serve ad accogliere l'uovo, è in metallo: totalmente schermata dalle microonde che riscaldano solo l'acqua della camera inferiore. Il vapore sale attraverso i fori di collegamento nella camera superiore e riscalda dolcemente l'uovo che, a seconda dei tempi impostati di cottura, può essere alla coque, bazzotto o sodo. Buon appetito!

Olio, yogurt e miele: fluidi e viscosità

Molto probabilmente vi sarà capitato di rimanere affascinati almeno una volta dallo strano modo in cui il miele preso da un vasetto lascia il cucchiaino per scendere dolcemente, mosso solo dalla forza di gravità, verso la fetta biscottata che lo attende più in basso. Il filo parte con un certo spessore e va via via assottigliandosi, senza rompersi, arrivando a toccare la fetta biscottata. Qui forma una leggera collinetta che si spande all'arrivo di nuovo miele che continua a depositarsi, avvolgendosi dolcemente a spirale su se stesso.

Altre sostanze si comportano in maniera simile al miele: gli yogurt, le creme spalmabili, la senape, il ketchup e altre salse più o meno dense. Tutte accomunate da una caratteristica fisica fondamentale: la *viscosità*, termine con il quale i fisici definiscono quanto una certa sostanza è resistente allo scorrimento.

La viscosità è una caratteristica fisica fondamentale dei fluidi. Più un fluido è viscoso, maggiore è la pressione a cui deve essere sottoposto per farlo scorrere in una tubatura, per esempio. Se prendiamo come sostanza di riferimento l'acqua, di cui tutti noi conosciamo bene il comportamento, è intuitivo comprendere come sarebbe assai più difficile la vita se questa avesse la viscosità del burro di arachidi, della mostarda o del miele, anche di quello più liquido. D'altra parte, l'etimologia del termine *viscoso*, da *vischio*, parla chiaro: la pianta del vischio produce delle bacche il cui succo veniva un tempo impiegato per preparare delle colle particolarmente appiccicose utilizzate per la cattura degli uccelli. Dopo tutto, può capitare a chiunque di trovarsi *invischiato* in situazioni sgradevoli!

Il primo a condurre studi quantitativi sulla viscosità dei fluidi fu lo scienziato britannico Isaac Newton (1642-1727), certamente più noto per aver enunciato le leggi della dinamica e la famosa legge di gravitazione universale. Se consideriamo un fluido e gli applichiamo uno sforzo di taglio (forza parallela alla superficie del fluido), gli strati superiori inizieranno a muoversi con una velocità maggiore di quelli via via inferiori. A definire la relazione fra la forza applicata e il gradiente del flusso di scorrimento (ovvero la variazione di velocità del fluido con la quota) è appunto la viscosità. A parità di sforzo di taglio applicato, maggiore è la viscosità di un fluido, minore è il gradiente del flusso.

Questo è evidente se confrontiamo ancora una volta il miele con l'acqua: il flusso del miele in caduta sotto l'azione della gravità è molto più lento (e ordinato) di quello dell'acqua, in virtù del fatto che le differenze di velocità fra i vari strati – concentrici, in questo caso – di miele sono molto minori di quelle presenti nell'acqua. Inoltre, a differenza dell'acqua, versando del miele in un piatto, questo non scorrerà in tutte le direzioni,

ma tenderà ad accumularsi nelle vicinanze del punto di caduta.

Ma perché il miele si arrotola su se stesso? Atterrando sul piccolo cono che si forma subito sulla fetta biscottata, il miele in caduta incontra un ostacolo che gli impedisce di arrivare direttamente alla superficie della fetta, e comincia a scivolare lungo le pareti del cono stesso. Il flusso dunque è costretto a piegarsi, ma la viscosità del miele è tale che il sottile filo della sostanza viene costantemente richiamato dalle forze interne per essere rimesso in linea. È proprio per questa tendenza al riallineamento che il miele cade arrotolandosi a spirale attorno alla collinetta di sostanza depositata sulla fetta biscottata. Seguendo sostanzialmente lo stesso destino di una corda (fatta di materia solida, badate bene!), con un'estremità a terra e l'altra che viene lasciata cadere da una certa altezza. D'altra parte corda e filo di miele seguono semplicemente quello che per loro è il percorso di minore resistenza, ovvero quello che richiede minor dispendio di energia.

Finora abbiamo immaginato del miele versato da un cucchiaino, o comunque in maniera tale che il flusso in caduta fosse filiforme (cilindrico o tubolare).

Ma che cosa accade se versiamo il miele direttamente da un vasetto con un'apertura molto grande? Anche per questo miele valgono naturalmente le stesse leggi applicate al miele in caduta con flusso filiforme, solo che questa volta, invece di un filo che si avvolge a spirale, osserveremo una striscia verticale di miele che oscilla avanti e indietro via via che cade, proprio come accade a una tenda, a una coperta o comunque a una stoffa di un certo spessore. Anche in questo caso, la striscia di miele e la tenda seguono il percorso che richiede una spesa minore di energia.

Alcuni ricercatori hanno studiato il moto di caduta di fluidi viscosi, scoprendone caratteristiche molto interessanti. Una di queste è per esempio la relazione che c'è fra l'altezza di caduta e la velocità di avvolgimento in spire del fluido stesso. In particolare, osservando il fenomeno per oli per trasmissione (la cui viscosità è fissata alla fabbricazione ed è quindi più controllabile e replicabile anche di quella di vasetti di miele provenienti da

una stessa fornitura), hanno scoperto che maggiore era l'altezza da cui l'olio veniva fatto cadere (da pochi ad alcune decine di centimetri), maggiore era il numero di spire che si formavano al secondo (arrivando a diverse centinaia di spire al secondo, chiaramente impercettibili per l'occhio umano).

Provate voi stessi con un miele denso o con una crema spalmabile ad alta viscosità: mettete il cucchiaino prima molto vicino al punto di caduta (non troppo, però, altrimenti l'avvolgimento scompare) e iniziate a cronometrare. Scoprirete immediatamente che basta sollevare il cucchiaino di pochi centimetri per veder raddoppiare la velocità di avvolgimento delle spire!

Quanto è più viscoso il miele dell'acqua? Il valore dipende dal tipo di miele con cui abbiamo a che fare, perché esistono varietà di miele dure e liquide. Queste ultime sono chiaramente molto meno viscose delle prime. Tenendo conto che la viscosità di un fluido dipende dalla temperatura (in particolare, all'aumentare di questa, nei liquidi la viscosità diminuisce, mentre nei gas aumenta), a 20 °C la viscosità media del miele è circa 10.000 volte maggiore di quella dell'acqua, quella del ketchup 50.000 volte, quella di una tipica crema spalmabile alcune centinaia di migliaia di volte. Latte e sangue hanno invece viscosità 3 volte superiore a quella dell'acqua, mentre la maggior parte degli oli vegetali si attesta su alcune decine di volte. La viscosità dell'acqua dimezza a circa 55 °C, mentre a 100 °C ha un valore inferiore a quello a 20 °C di oltre il 70 per cento.

Un caso interessante è quello degli oli lubrificanti per motori che – appunto – sono classificati in base alla loro viscosità. In generale, essi devono garantire buone prestazioni in intervalli di temperatura anche molto ampi se consideriamo che devono lavorare sia in inverno, quando le temperature possono scendere abbondantemente sotto gli 0 °C, sia in estate, quando si possono toccare anche i 40 °C. In particolare, un buon olio lubrificante deve rimanere sufficientemente fluido a basse temperature, in modo da facilitare l'avviamento del motore, ma deve anche garantire un buon grado di viscosità alle alte temperature, tipiche del

motore sotto sforzo.

La prossima volta che fate il cambio dell’olio della vostra auto non prendete il primo olio che capita, ma acquistate quello più adatto sulla base delle temperature stagionali del luogo in cui vivete.

Solidi viscosi

Prima di concludere la sezione dedicata alla viscosità dei fluidi, vogliamo scrivere due parole sulla viscosità dei solidi. Sì, avete letto bene: dei solidi. Alcuni studiosi ritengono infatti che la distinzione fra liquidi e solidi sia essenzialmente legata ai valori di viscosità. In pratica, possiamo parlare di sostanza solida quando questa ha una viscosità pari a un milione di miliardi di volte quella dell’acqua.

Ma ci sono solidi che in effetti hanno viscosità inferiori a questo valore. Sono i *solidi amorfi*, ovvero quei solidi che non hanno forma propria né struttura cristallina, ovvero che a livello microscopico non rivelano un reticolo ordinato (cristallo), ma mostrano una totale assenza di periodicità spaziale, esattamente come accade in un liquido. I solidi a struttura amorfa sono definiti sostanze vetrose o, più semplicemente, vetri.

Esiste anche un esperimento che dura ormai da ottant’anni, volto a misurare la viscosità della pece, un classico esempio di solido amorfo. Venne iniziato nel 1927 da Thomas Parnell, professore di fisica all’Università del Queensland, a Brisbane, in Australia, proprio per dimostrare agli studenti che alcune sostanze, solo in apparenza solide, sono in realtà fluidi molto viscosi.

L’esperimento, condotto senza nessun particolare controllo della temperatura ambiente, consiste nell’osservare la lenta percolazione di un campione di pece attraverso un imbuto, la cui bocca inferiore venne aperta solo tre anni dopo il versamento del campione, nel 1930. Da quel momento sono cadute solo otto gocce di pece, l’ultima delle quali il 28 novembre 2000.

Queste osservazioni hanno permesso agli sperimentatori non solo di stimare che la viscosità della pece è circa 100 miliardi di volte quella

dell'acqua, ma anche di entrare nel *Guinness Book of Records* per l'esperimento continuo di maggior durata del mondo e di guadagnarsi nel 2005 il premio *Ig Nobel* (ignobile), parodia dell'assai più prestigioso premio Nobel, promossa dalla rivista scientifica satirica *Annals of Improbable Research* (Annali di ricerche improbabili).

FRIGO E CONGELATORE, CICLI TERMODINAMICI DOMESTICI

Prima di andare a vedere i meccanismi di funzionamento di frigoriferi e congelatori, e parlare quindi di macchine termiche e cicli termodinamici, occorre introdurre brevemente i concetti fondamentali della termodinamica. Le pagine che seguono, un po' più teoriche, ci saranno utili anche in moltissime altre parti del libro, tutte le volte che incontreremo trasformazioni energetiche, cambiamenti di temperatura, passaggi di calore e altro ancora. Lo sforzo necessario per affrontarle sarà quindi ampiamente ripagato dalla semplicità con cui poi potremo affrontare molti argomenti dei capitoli successivi.

Il punto di vista macroscopico

Prima di affrontare la formulazione dei princìpi della termodinamica, apriamo una breve parentesi teorica per capire meglio di che cosa trattano.

In generale, quando si vuole risolvere un problema reale applicando i princìpi scientifici, si individua nello spazio una regione, ovvero una quantità di materia finita, e su questa si concentra l'attenzione. Questa regione (idealmente separata dallo spazio che la circonda) viene detta *sistema*, mentre tutto ciò che le è esterno ma può influenzarne il comportamento prende il nome di *ambiente* (circostante).

Una volta definito il sistema, il passo successivo consiste nel descriverlo in termini di quantità legate al comportamento del sistema stesso o alle sue interazioni con l'ambiente circostante o a entrambe queste cose. Per far questo si possono adottare due punti di vista: quello microscopico e quello macroscopico. La descrizione macroscopica di un sistema avviene con la

specificazione delle sue fondamentali quantità misurabili, per esempio, per un gas, pressione, volume e temperatura.

La correlazione fra il punto di vista microscopico e quello macroscopico sta nel fatto che quelle poche grandezze direttamente misurabili, che costituiscono la descrizione macroscopica del sistema, sono in realtà medie nel tempo di un gran numero di proprietà microscopiche. Per esempio, la grandezza macroscopica *pressione* è il valore medio della variazione di quantità di moto per unità di tempo dovuto agli urti molecolari su un'area unitaria.

La descrizione macroscopica di un sistema si ottiene specificandone le caratteristiche globali per mezzo di poche grandezze misurabili. La conoscenza di un numero sufficiente di queste coordinate permette di determinare lo stato interno di un sistema e, in particolare, la sua energia interna.

I princìpi della termodinamica

In origine il termine *termodinamica* stava a indicare la scienza del calore. Solo successivamente, quando ci si rese conto delle diverse proprietà del calore, la parola cominciò a indicare lo studio delle trasformazioni dell'energia nelle sue varie forme.

Alla base della termodinamica ci sono quattro postulati, detti *princìpi della termodinamica*, numerati curiosamente da 0 a 3 per ragioni storiche. Il principio zero, infatti, è stato l'ultimo a essere formulato (negli anni Trenta del secolo scorso!), ma ciò che esprime è necessario alla comprensione degli altri tre: per questo motivo si chiama principio zero e non quarto principio della termodinamica.

Il primo e il secondo principio trassero origine dalle ricerche del britannico William Thomson, poi nominato Lord Kelvin (1824-1907), e del tedesco Rudolf Clausius (1822-1888), e anche per essi, l'ordine di apparizione non rispetta l'ordine cronologico. È stato appurato, infatti, che venne formulato prima il secondo principio, ma il primo sta concettualmente a monte del secondo: ecco qua la ragione di questa

ulteriore curiosità. Il terzo principio, infine, potrebbe anche non essere considerato un vero principio: scopriremo fra poco perché. Vediamo brevemente che cosa affermano, uno per uno, questi princìpi.

Il *principio zero* si riferisce alla possibilità di definire la temperatura di un oggetto. La temperatura è un modo quantitativo, e quindi più raffinato, di esprimere la nozione qualitativa di passaggio di calore da un corpo a un altro: il principio zero asserisce che un corpo caldo ha una temperatura più alta di un corpo freddo e che se fra due corpi posti a contatto non c'è passaggio di calore allora essi hanno la stessa temperatura.

Più rigorosamente: se due corpi A e B sono in equilibrio termico con un terzo corpo C (che definiremo successivamente termometro), allora lo sono anche fra loro. Ma su che cosa sia effettivamente la temperatura, che cosa misuri e che cosa significhi equilibrio termico torneremo più avanti nel testo. Qui basti sapere che, come nella dinamica, branca della fisica che studia il moto dei corpi, la variabile fondamentale è il tempo, così in termodinamica la variabile fondamentale è la temperatura. E le analogie fra tempo e temperatura non si fermano qui.

Il *primo principio* afferma, nella sua estrema sostanza, che l'energia si conserva: fu questo il concetto fondamentale rivelato dagli studi di Kelvin e di Clausius attorno al 1850. E l'energia, allora immersa nelle nebbie del pensiero scientifico, venne alla ribalta e diventò ben presto uno dei concetti fondamentali e unificatori della fisica, se non addirittura il più importante, spodestando il concetto di forza che, da Newton fino ad allora, aveva dominato incontrastato la scena, con la sua apparente tangibilità e con la possibilità di trattarlo matematicamente.

Definire l'energia non è semplice, nonostante la parola sia così familiare al giorno d'oggi (tanto da farcene perdere il profondo significato concettuale). Non desiderando addentrarci, né qui né in altri punti di questo libro, nei meandri della trattazione matematica, richiederemo un piccolo sforzo di comprensione, affermando che il concetto stesso sia adeguatamente definito come la capacità, da parte di un corpo, di compiere lavoro, naturalmente come lo si intende in fisica, cioè come prodotto di

una forza per uno spostamento (qui ci scusiamo con i lettori più preparati della necessaria perdita di rigore).

Della comprensione del concetto di energia e dell'evidenziazione delle sue proprietà dobbiamo essere debitori – lo ripetiamo – a Clausius e, soprattutto, a Kelvin, che ebbe l'illuminazione e il ripensamento sulla conservazione del calore dopo aver incontrato il suo compatriota James Prescott Joule (1818-1889) e aver conosciuto i risultati degli esperimenti che aveva fatto sul calore, sul lavoro meccanico e sulle loro reciproche trasformazioni.

Il *secondo principio* afferma che certe trasformazioni avvengono di preferenza in un verso piuttosto che nell'altro, come per esempio il fatto che se due corpi, uno caldo e uno freddo, vengono posti a contatto, quello caldo si raffredda e quello freddo si riscalda fino a raggiungere una temperatura intermedia, ma non avviene mai che il corpo caldo si riscaldi ulteriormente a spese di quello freddo.

In altre parole, in natura esiste un'evidente asimmetria a cui noi quotidianamente assistiamo: un vaso che cade facilmente si frammenterà in una miriade di cocci, i quali con estrema improbabilità si riuniranno spontaneamente per restituire al vaso la forma originaria, percorrendo a ritroso la trasformazione.

Questa asimmetria, per noi così evidente, fu possibile formalizzarla solo nella seconda metà del XIX secolo, quando appunto fu chiaro il concetto di energia. Essa infatti riguarda in ultima analisi i processi di trasformazione dell'energia. Benché la sua quantità totale si conservi – come sancisce il primo principio, e sotto certe ipotesi che non staremo qui ad approfondire – ciò che invece si modifica irreversibilmente è la sua qualità.

L'energia non si crea né si distrugge quindi, ma si deteriora, nel senso che della stessa quantità di energia, una frazione sempre minore rimane utilizzabile (in questo ragionamento sarà evidente per l'attento lettore tutta la derivazione utilitaristica del concetto di energia mutuato dalla rivoluzione industriale).

Il secondo principio afferma proprio la direzione verso la quale si muovono i vari processi di trasformazione naturale dell'energia affinché essa si deteriori sempre più: è questa la freccia del tempo. Il tempo scorre inesorabilmente nella direzione in cui l'energia si degrada.

Infine il *terzo principio*. Esso si occupa del comportamento della materia alle basse temperature, affermando in particolare che non è possibile raggiungere lo zero assoluto di temperatura con un numero finito di passaggi (la scala assoluta di temperatura è quella stabilita da Lord Kelvin e la sua unità di misura è appunto il kelvin, con simbolo K; 0 K corrispondono a -273,15 °C e sono la più bassa temperatura esistente in natura).

Più semplicemente, volendo raffreddare la materia indefinitamente, solo dopo un tempo infinitamente lungo la vedremmo raggiungere lo zero assoluto. Appare chiaro come questo principio sia assai meno intuitivo degli altri. Il motivo è legato al fatto che il terzo principio, a differenza degli altri, provenienti dall'esperienza diretta di fenomeni macroscopici e assolutamente indipendenti da ogni ipotesi sui costituenti della materia, trova il suo fondamento proprio nelle teorie quantistiche della materia.

Su questi quattro princìpi si fondano tutta la scienza termodinamica e… gran parte delle attività umane.

La natura di calore e lavoro, ovvero: come trasformare l'energia

Addentriamoci dunque nei meandri delle trasformazioni energetiche, cercando di mettere in luce due concetti chiave: lavoro e calore.

La definizione di *lavoro*, proveniente dalla meccanica, non crea molte difficoltà né dal punto di vista formale né da quello contenutistico. Per esempio, si compie lavoro contro il campo gravitazionale ogni volta che solleviamo un peso dal pavimento, mentre non eseguiamo nessun lavoro se trasportiamo lo stesso peso mantenendolo sempre alla stessa altezza dal suolo. Molto spesso, invece, si incontrano non poche contraddizioni, anche nell'ambito dello stesso testo, quando si tratta il concetto di *calore*.

Agli inizi della scienza termodinamica, e fino a poche decine di anni fa, la maggior parte degli autori con la parola calore si riferiva all'energia associata al moto disordinato delle molecole: quella che in termodinamica si chiama adesso *energia cinetica interna* (essa è, fra l'altro, direttamente proporzionale alla temperatura del corpo in questione, da cui l'interpretazione microscopica della temperatura, secondo la quale essa è proprio la misura del livello di agitazione delle molecole, cioè dell'energia cinetica legata al loro moto disordinato).

In realtà, i concetti di calore e di lavoro si riferiscono solo ed esclusivamente ai processi di trasferimento di energia.

Riscaldare un oggetto significa trasferirgli energia, utilizzando la differenza di temperatura esistente fra il corpo e una sorgente di calore (naturalmente a temperatura più alta) posta a contatto con esso.

Raffreddare un corpo significa realizzare il processo inverso: estrargli parte del suo contenuto energetico mettendolo a contatto con un corpo a temperatura più bassa della sua.

Per questo non ha più alcun senso parlare di calore contenuto in un corpo: il calore è, per convenzione, energia scambiata in funzione della temperatura.

Lo ripetiamo, per maggior chiarezza: la grandezza che contraddistingue in termodinamica il contenuto energetico di un corpo non è il calore, ma l'energia interna. Il calore passa, si trasferisce, si scambia, si assorbe o si cede, ma non si può contenere né tantomeno fermare.

In maniera analoga possiamo dire per il lavoro, il quale può essere compiuto, eseguito o, al limite, subìto. Si compie lavoro su un sistema ogni qual volta si ha necessità di modificarne l'energia con un metodo che non comporti l'esistenza di una differenza di temperatura (e di evitare quindi uno scambio di calore).

Tutte le considerazioni fin qui fatte, se da una parte ci hanno permesso di chiarire (speriamo) la natura qualitativa del calore, dall'altra non ci hanno indicato come sia possibile misurarne la quantità. Ecco dunque quella che è nota come definizione termodinamica di calore: quando un sistema (che

si trova a temperatura diversa da quella dell'ambiente circostante e su cui può essere eseguito del lavoro) compie una trasformazione, l'energia trasferita con mezzi non meccanici (che è uguale alla differenza fra la variazione di energia interna e il lavoro compiuto) viene detta *calore*.

Questa definizione, trasformata in equazione, ci offre un modo di misurare la quantità di calore che viene scambiata fra sistema e ambiente, ma ci dice anche di più. Ci dice che l'eventuale disavanzo, in più o in meno, di energia interna del sistema rispetto al lavoro compiuto da o su di esso è attribuibile a un passaggio di calore fra questo e l'ambiente. In altre parole, questa è la formulazione matematica del primo principio della termodinamica, ma soprattutto l'espressione del fatto che l'energia si conserva (principio di conservazione dell'energia).

Le trasformazioni spontanee e l'entropia

Gli studi di Joule dimostrarono che calore e lavoro potevano essere convertiti l'uno nell'altro e viceversa, seppur con alcune fondamentali limitazioni. Queste limitazioni sono proprio alla base delle due formulazioni del secondo principio della termodinamica.

La prima, dovuta a Lord Kelvin (e prende perciò il nome di *enunciato di Kelvin* del secondo principio), afferma che: non è possibile realizzare una trasformazione nella quale il solo risultato sia l'assorbimento di calore da una riserva termica e la sua completa conversione in lavoro. Esso sancisce in pratica l'impossibilità di convertire completamente il calore in lavoro: qui dunque, proprio in questa impossibilità, sta la fondamentale asimmetria della natura, quella che porta ai concetti di entropia, di reversibilità e irreversibilità, di ordine e disordine, di caos, di freccia del tempo, di auto-organizzazione e, in ultima analisi, all'incredibile diversità di strutture, viventi o inanimate, esistenti nell'Universo. Benché infatti calore e lavoro siano equivalenti, nel senso che entrambi rappresentano un modo di trasferire energia, essi non sono equivalenti, per quanto riguarda la possibilità di scambiarsi l'uno con l'altro.

Poche righe sopra, parlando di entropia, caos, tempo, ci eravamo

apparentemente lasciati prendere un po' la mano: ma solo apparentemente. Uno degli aspetti curiosi della termodinamica, e che fanno di essa una scienza affascinante, è rappresentato proprio dal modo in cui osservazioni apparentemente poco correlate fra loro risultano equivalenti. Come esempio plateale, citiamo l'altra formulazione del secondo principio, nota come *enunciato di Clausius* (a cui, ovviamente, è dovuta): non è possibile realizzare una trasformazione nella quale il solo risultato sia il trasferimento di calore da un corpo più freddo a uno più caldo. L'enunciato di Clausius esprime l'ovvia osservazione, basata sull'esperienza quotidiana che una qualunque trasformazione esistente in natura che implichi trasferimento spontaneo di energia (in assenza cioè di un intervento esterno) procede nel verso seguente: il calore fluisce spontaneamente dal corpo caldo al corpo freddo, non viceversa.

L'enunciato di Clausius riconosce una fondamentale asimmetria della natura, anche se apparentemente differente da quella evidenziata da Kelvin. Quest'ultimo, infatti, cita l'asimmetria fra calore e lavoro, mentre Clausius non cita apertamente il lavoro, ma esprime l'asimmetria nella direzione in cui si verifica una trasformazione spontanea. Si può dimostrare, però, che i due enunciati sono assolutamente equivalenti: sono perciò due facce della stessa medaglia. Di secondo principio della termodinamica ne esiste solo uno.

Per esprimerlo matematicamente occorre fare ricorso a una nuova grandezza termodinamica, la più importante forse, ma sicuramente quella che incute maggior timore reverenziale: l'*entropia*. Essa fornisce, in un certo senso, la misura del disordine di un sistema o, in altre parole, della qualità dell'energia in esso contenuta.

Come è naturale pensare e osservare quotidianamente che un qualunque sistema isolato (ricordiamo che si definisce sistema isolato un sistema che non abbia scambi né di materia né di energia con l'ambiente circostante) evolve spontaneamente da stati ordinati (cui corrisponde un'entropia di valore minore) a stati via via più disordinati (a entropia maggiore), così i sistemi si evolvono da stati a energia qualitativamente migliore (a bassa

entropia) verso stati a energia peggiore (ad alta entropia): i sistemi evolvono nel senso in cui l'energia si degrada, e la grandezza che misura l'entità di questo degrado è proprio l'entropia, come lasciato intuire nei commenti fra parentesi.

E qual è la relazione fra l'entropia e gli enunciati di Kelvin e Clausius del secondo principio della termodinamica? A questo punto la risposta è diventata banale: qualunque trasformazione spontanea è accompagnata da un aumento dell'entropia complessiva del sistema e dell'ambiente circostante (enunciato formale del secondo principio della termodinamica). I due precedenti enunciati, più ovvi perché dedotti dall'esperienza diretta, sono così riassunti in questo, più sintetico, ma anche più formale, perché dipendente da una specificazione della proprietà dell'Universo denominata entropia, tutt'altro che mutuata dall'esperienza.

Perdendo un po' di rigore, possiamo affermare che il calore è perciò forma meno nobile di trasferimento di energia, perché disordinata (è cioè ad alta entropia) rispetto al lavoro meccanico, ordinato e indirizzabile a piacimento fra sistema e ambiente: ecco spiegato perché il lavoro può completamente convertirsi in calore, ma non potrà mai accadere il contrario, cioè convertire completamente calore in lavoro. In realtà, teoricamente è possibile dimostrare che, sotto particolari ipotesi, esiste una circostanza in cui la conversione completa di calore in lavoro può avvenire: alla temperatura di 0 K (cioè, allo zero assoluto). Ma, come abbiamo affermato parlando dei fondamenti su cui si basa la termodinamica, non è possibile raggiungere lo zero assoluto con un numero finito di passaggi (di raffreddamento): questo è l'enunciato del terzo principio della termodinamica. Allora potremmo concludere questo paragrafo ricapitolando la termodinamica nel seguente modo:

- il calore può essere convertito in lavoro (primo principio);
- ma può esserlo completamente solo allo zero assoluto (secondo principio);
- e lo zero assoluto non è raggiungibile (terzo principio)!

La Natura, non c'è che dire, è davvero beffarda!

Il ciclo frigorifero: ecco svelato il mistero!

Riprendiamo un attimo l'enunciato di Clausius del secondo principio della termodinamica. Esso afferma l'impossibilità di trasferire calore da un corpo più freddo a un corpo più caldo senza altri passaggi energetici all'interno del sistema considerato.

In altre parole, se è vero che il calore fluisce naturalmente da un corpo più caldo a uno più freddo, perché si possa realizzare il passaggio inverso occorre agire in qualche maniera sul sistema.

È esattamente quello che vogliamo che accada nei nostri frigoriferi e congelatori, al cui interno vogliamo abbassare la temperatura e tenerla sempre molto bassa, nonostante l'ambiente circostante sia in genere a temperature nettamente più alte.

Per ottenere questo risultato occorre fornire energia al sistema. L'energia che viene appunto prelevata dalla presa di corrente del frigorifero per andare ad alimentare un compressore, dispositivo che è alla base del funzionamento del cosiddetto *ciclo frigorifero*, un particolare tipo di ciclo termodinamico in grado di estrarre calore da un sistema a bassa temperatura e trasferirlo a uno a temperatura superiore.

Per definizione, un *ciclo termodinamico* è una successione di processi termodinamici – espansioni, compressioni, variazioni di temperatura, cambiamenti di stato ecc. – al termine della quale il sistema torna al suo stato iniziale.

Cicli termodinamici sono quelli che si verificano all'interno dei motori a combustione interna, per esempio, o in qualunque altra macchina termica ciclica. Per tutti questi vale la regola imposta dalla prima legge della termodinamica (che, ricordiamo, è una versione generalizzata della legge di conservazione dell'energia) ovvero che il bilancio fra il calore netto entrante dall'ambiente (o uscente dal sistema) sia esattamente uguale al lavoro netto compiuto in ogni ciclo dal sistema sull'ambiente (o dall'ambiente sul sistema).

Ora, nel ciclo frigorifero ci troviamo proprio nella situazione in cui a fronte di un lavoro netto compiuto dall'ambiente sul sistema (frutto

dell’energia fornita dall’esterno) ci troviamo con il sistema a temperatura più bassa, a causa di un trasferimento netto di calore dal sistema stesso all’ambiente.

Per ottenere questo risultato, il cosiddetto *ciclo a compressione* – impiegato nella maggioranza dei frigoriferi e congelatori domestici – sfrutta un fluido intermedio (detto *refrigerante*), con cui sistema e ambiente possono scambiare calore.

In particolare, le quattro trasformazioni del ciclo possono essere sintetizzate così:

1) *espansione*, dove il refrigerante, espandendosi rapidamente, diminuisce pressione e temperatura, passando in parte dallo stato liquido a quello di vapore;
2) *evaporazione*, dove il refrigerante cambia completamente di stato passando da liquido a vapore sottraendo calore dal sistema;
3) *compressione*, dove il vapore refrigerante viene appunto compresso, subendo un drastico aumento di temperatura;
4) *condensazione*, dove il vapore riduce la temperatura trasferendo calore verso l’ambiente esterno e passando nuovamente allo stato liquido.

Così, sfruttando successivi passaggi di stato liquido-vapore e di compressione-espansione, è possibile raffreddare un corpo senza avere a disposizione alcun altro corpo a temperatura più bassa. Il ciclo procede fino a che, all’interno dei vani del frigorifero e del congelatore, non si raggiungono le temperature indicate dai termostati. Se, per cause varie (apertura del frigorifero, inserimento di cibi caldi, scambi di calore con l’esterno), la temperatura interna del frigorifero si alza di nuovo, il compressore torna in funzione per riattivare il ciclo fino al ritorno alla temperatura desiderata.

La scelta del fluido refrigerante è piuttosto delicata: esso deve avere infatti caratteristiche fisiche tali da garantire tutti i passaggi del ciclo frigorifero negli intervalli di temperatura richiesti.

Per lungo tempo sono stati usati fluidi refrigeranti come il freon (nome commerciale di alcuni composti chimici con marchio registrato della Du

Pont) e altri clorofluorocarburi (CFC), o altre sostanze refrigeranti che purtroppo però si sono rivelate tutte dannose: alcune per gli effetti negativi sulla formazione dello strato di ozono stratosferico (che, come accennato parlando di onde elettromagnetiche, ci protegge dai raggi ultravioletti provenienti dal Sole), altre per il loro alto potenziale di effetto serra, ovvero per il loro contributo all'innalzamento della temperatura media del nostro pianeta.

Attualmente, dopo la messa al bando di questi fluidi, i produttori di frigoriferi e congelatori si sono affidati al tetrafluoroetano che, sebbene sia sicuro per lo strato di ozono, non lo è altrettanto per il clima terrestre. Cosicché, con la consapevolezza che a breve anche il tetrafluoroetano verrà proibito, non resta che continuare la ricerca di nuovi fluidi refrigeranti che possano essere nello stesso tempo efficienti e sicuri. A meno che non si decida tutti quanti di fare a meno di frigoriferi, congelatori, climatizzatori e condizionatori d'aria.

II
La fisica in bagno

Di rubinetti che perdono, di miscelatori che non funzionano e di bolle di sapone

Ogni moto d'acqua fa flusso e riflusso in ogni parte d'essa,
dove la velocità del corso suo si ritarda.
LEONARDO DA VINCI

Lavandini, docce, vasche da bagno, idromassaggi, bidet, water, rubinetti, miscelatori, tubazioni e condotti: la stanza da bagno sembra proprio il laboratorio perfetto per studiare la dinamica dei fluidi e, in particolare, l'*idrodinamica*, ovvero quel particolare settore della fisica che studia il moto dei liquidi. E quale liquido si presta meglio dell'acqua per le nostre sperimentazioni domestiche? Non sporca ed è facile da smaltire o asciugare… ma, anche se siete presi dall'entusiasmo del ricercatore, fate sempre attenzione a non allagare la vostra casa!

GOCCIA A GOCCIA

È notte fonda, ci giriamo e rigiriamo nel letto, cercando una posizione comoda che ci aiuti a riprendere sonno. Siamo stanchissimi, eppure non riusciamo a dormire. C'è qualcosa che ci infastidisce, ma non riusciamo a focalizzare che cosa sia. Ci alziamo per bere un bicchiere d'acqua e d'improvviso capiamo: è il ticchettio del rubinetto del bagno che perde che disturba il nostro sonno in maniera insopportabile. Eppure al tic-tac della vecchia sveglia che teniamo in camera o della pendola appesa in corridoio ci siamo abituati: perché allora non riusciamo a sopportare lo sgocciolamento del rubinetto?

Le motivazioni possono essere tante, alcune anche psicologiche, ma forse è coinvolto anche un fattore fisico: a differenza del ticchettio degli orologi, periodico e regolare, quello dei rubinetti che perdono è tipicamente aperiodico e irregolare. Aperiodico perché le gocce non cadono a intervalli regolari, irregolare perché il suono prodotto dalla goccia alla fine della sua corsa è sempre diverso, anche di volume. Insomma, un vero caos.

Ebbene sì, forse non lo sapevate, ma in casa avete un vero e proprio *sistema caotico*; in altre parole un sistema dinamico di cui è praticamente impossibile prevedere il comportamento, pur conoscendo perfettamente tutte le leggi fisiche che ne regolano l'andamento. Una vera dannazione per i fisici. Ma come può accadere un fenomeno del genere? Per capirlo, occorre raccontare brevemente la storia della nascita di una nuova scienza: la *scienza del caos*.

Tutto cominciò nel 1963, quando il meteorologo statunitense Edward Norton Lorenz (1917-2008) decise di studiare al computer la dinamica dell'atmosfera terrestre. Lo scopo, naturalmente, era quello di arrivare a previsioni meteorologiche sempre più affidabili. Ma facendo girare i propri modelli al calcolatore, basati su leggi fisiche esatte e perfettamente conosciute, Lorenz arrivò presto a una scoperta incredibile: partendo da due stati iniziali anche solo leggermente differenti, il sistema poteva evolvere rapidamente verso stati dinamici molto diversi fra loro, diventando sostanzialmente imprevedibile; questo nonostante che l'esattezza delle leggi che ne regolano l'evoluzione nel tempo non lasciasse spazio per delle sorprese. Eppure, il computer diceva a Lorenz che, in certe condizioni, anche un leggerissimo soffio di vento avrebbe potuto trasformarsi in un uragano.

Non era un errore. Se si trova in certe condizioni iniziali, un sistema dinamico complesso può veramente evolvere in maniera imprevedibile, come se fosse il risultato di processi aleatori o casuali, anche se conosciamo esattamente le leggi che ne descrivono il comportamento.

È per questo che Lorenz coniò la famosa espressione *effetto farfalla*,

entrata ormai anche nel linguaggio comune e ben descritta dalle sue parole: «Fenomeni modesti che si generano su piccola scala, come il battito d'ali di una farfalla, possono indurre trasformazioni di immensa portata e notevole intensità su larga scala, come lo sviluppo di un tornado. Piccole turbolenze microscopiche, infatti, possono determinare grossi mutamenti macroscopici, mentre semplici eventi dinamici circoscritti possono originare processi straordinariamente complessi e imponenti».

Ecco perché è così difficile fare previsioni meteorologiche!

Dopo la sua scoperta, si trovò che era possibile applicare la scienza del caos a innumerevoli altri sistemi dinamici complessi, anche non fisici, che solo apparentemente avevano un comportamento casuale e disordinato, ma in realtà regolato da precise leggi: certe reazioni chimiche, le orbite di alcuni sistemi planetari, ma anche l'andamento dei mercati finanziari, lo sviluppo di un sistema biologico o l'evoluzione di un gruppo sociale ne sono esempi.

Alla base della scienza del caos, il cui scopo è quello di individuare regolarità laddove sembra che non ve ne siano, si trova una proprietà fondamentale dei sistemi dinamici complessi conosciuta tecnicamente con il nome di *dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali*.

Con questa espressione gli studiosi del caos intendono dire che un sistema può evolvere nel tempo con modalità del tutto diverse anche se gli stati iniziali sono molto vicini fra loro. In altre parole, un errore piccolissimo nella conoscenza dello stato di partenza di un sistema (ovvero la condizione in cui si trova il sistema nell'istante di tempo scelto come istante iniziale) può propagarsi in maniera tale da rendere impossibile determinare con certezza come questo evolverà nel tempo e dare così previsioni certe sui suoi possibili stati futuri.

Tuttavia, non tutti i sistemi sono caotici. Perché lo siano – o meglio, perché lo possano diventare – occorre che il sistema di equazioni matematiche che ne descrive il comportamento contenga almeno un'equazione non lineare.

Ciò significa che non è tanto la quantità di variabili necessarie per

descrivere il sistema né la complessità delle equazioni stesse a determinare il comportamento caotico di un sistema, quanto il fatto che anche una sola equazione descrittiva contenga un termine non lineare, dato per esempio dal prodotto di due variabili, o da una variabile presente al quadrato o al cubo. Dal punto di vista fisico, un termine non lineare significa generalmente una *retroazione* (nota anche con il termine inglese *feedback*) del sistema dinamico, ovvero la capacità del sistema stesso di modificare dinamicamente le proprie caratteristiche, tenendo conto, istante per istante, delle condizioni in cui si trova.

La retroazione è una proprietà fondamentale di molti sistemi complessi, ivi compresi quelli biologici (come gli organismi viventi, gli ecosistemi o anche l'intera biosfera), sociali ed economici. Essa può essere *positiva*, ovvero in grado di amplificare i cambiamenti, allontanando definitivamente il sistema dal suo stato di partenza, o *negativa*, ossia in grado di contrastare gli effetti di eventuali modifiche allo stato di partenza, svolgendo così un ruolo di autoregolazione.

Un esempio di retroazione positiva è dato dallo scioglimento dei ghiacci polari causato dal riscaldamento globale.

I ghiacci sono in grado di riflettere la luce solare: in loro presenza, quindi, una minore quantità di radiazione solare viene assorbita dal Pianeta. Ma via via che il riscaldamento globale aumenta, l'estensione dei ghiacciai diminuisce, facendo sì che la Terra assorba sempre più radiazione solare, contribuendo così all'aumento della temperatura del Pianeta. Un sistema di questo tipo è naturalmente instabile e porta, in assenza di altri interventi esterni, allo scioglimento totale dei ghiacciai.

Sempre parlando del nostro pianeta, un esempio di sistema a retroazione negativa è invece dato dal comportamento del vapore acqueo presente in atmosfera.

Se la temperatura aumenta, aumenta anche la quantità di vapore in atmosfera e, di conseguenza, aumenta il numero di nubi, capaci anch'esse, come i ghiacci, di riflettere la radiazione solare.

È a questo punto che si osserva la retroazione negativa, che riporta il

sistema alla stabilità: la minore quantità di radiazione solare in ingresso porta alla riduzione della temperatura e, infine, a una minore presenza di vapore acqueo in atmosfera. Così, in assenza di fattori esterni, la quantità di vapore acqueo in atmosfera non supera né può scendere mai sotto un certo valore, ma si limita a oscillare fra questi due estremi.

Parlando di scienza del caos e di sistemi complessi, siamo arrivati lontano, addirittura a parlare del riscaldamento globale del nostro pianeta. Ma, per finire questa sezione, vogliamo tornare per un attimo al nostro rubinetto che perde. Un sistema all'apparenza semplicissimo, dove in gioco entrano fattori ben noti, come la forza di gravità (che fa cadere la goccia), la tensione superficiale dell'acqua (che fa sì che la goccia si formi), la pressione dell'acqua nel rubinetto e quella atmosferica al di fuori.

Ma anche un sistema con cui ognuno di noi può sperimentare quella che gli scienziati chiamano *transizione al caos*: nel nostro caso il passaggio da un regime di gocciolamento regolare e periodico, o di flusso lento, a un regime caotico, contraddistinto da irregolarità e aperiodicità del gocciolamento stesso. E per arrivare al flusso caotico è sufficiente variare anche di pochissimo le condizioni iniziali del gocciolamento: una piccola variazione nella pressione dell'acqua, per esempio, e quello che sembrava un cronometro perfetto diventa un orologio impazzito.

Esperimenti sul gocciolamento dei rubinetti vennero per la prima volta condotti agli inizi degli anni Ottanta dello scorso secolo dal fisico statunitense Robert Stetson Shaw, presso l'Università della California a Santa Cruz. Egli scoprì che quello del rubinetto che perde è effettivamente un sistema caotico in miniatura, in cui, quando si trova a regime caotico, è impossibile prevedere come e quando cadrà la goccia successiva.

Il fattore fondamentale sembra essere, in questo caso, la velocità di formazione della goccia stessa. In condizioni di flusso lento, infatti, la goccia può formarsi riempiendosi d'acqua in maniera regolare, mentre in condizioni di flusso veloce, la goccia si forma oscillando e vibrando sotto la spinta della pressione dell'acqua in ingresso. Sono proprio queste

oscillazioni e vibrazioni a rendere irregolare il processo di formazione e imprevedibile il momento in cui la goccia si staccherà per lasciare il posto alla formazione di quella successiva.

La prossima volta che vi capita di avere in casa un rubinetto che perde, pensate anche solo un attimo al fatto che il problema di chiamare l'idraulico per ripararlo è ben poca cosa rispetto a quello che hanno i fisici nel cercare di capire questo strano sistema. Chissà che non vi sia di consolazione!

Calda, fredda, calda... giusta!

Parlando dei sistemi complessi, abbiamo detto che sono soggetti a fenomeni di retroazione e che questa può essere positiva o negativa. Anche un semplice rubinetto a miscelatore della doccia o del bagno di casa può essere usato per capire bene in che cosa consiste la retroazione, che per altro troviamo ben descritta nel famoso verso della canzone *Lo shampoo* di Giorgio Gaber, che dà il titolo a questa sezione.

Vediamo perché.

Quando apriamo il miscelatore, la temperatura dell'acqua in uscita avrà un certo valore. Supponiamo che sia troppo fredda per i nostri gusti. Allora gireremo il miscelatore per avere un apporto maggiore di acqua calda. In genere, però, l'effetto dell'azione non viene percepito all'istante, cosicché, pensando che l'acqua sia ancora fredda, continueremo a girare il miscelatore per avere l'acqua ancora più calda; il risultato è che l'acqua a questo punto è davvero troppo calda. E quindi piano piano ripercorriamo a ritroso i passaggi cercando di avvicinarci alla temperatura giusta.

Un sistema così descritto, naturalmente a retroazione negativa, è senz'altro stabile – la temperatura dell'acqua varia in un intervallo di valori limitato – ma non ha tanto un valore unico di temperatura quanto piuttosto un valore di temperatura che oscilla attorno al valore medio.

Quello che abbiamo appena descritto è un caso tipico di *anello di feedback con ritardo*, dove il ritardo è appunto il tempo che intercorre fra

il momento in cui noi modifichiamo lo stato del sistema (per esempio girando il miscelatore verso il caldo) e il momento in cui l'effetto stesso viene preso in considerazione per modificare ulteriormente il sistema (percependo l'acqua troppo calda e girando di conseguenza il miscelatore verso il freddo).

Ma oltre a permetterci di chiarire con un esempio domestico il fenomeno della retroazione, i miscelatori di casa ci offrono l'opportunità di approfondire uno dei concetti fondamentali della termodinamica e della fisica in generale: il concetto di temperatura.

La temperatura e la sua misura

Fu durante i suoi studi che il fisico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) ebbe la brillantissima intuizione di comprendere come tutte le proprietà macroscopiche dei corpi, percepite nella nostra esperienza quotidiana attraverso i sensi, fossero direttamente collegate con equivalenti proprietà microscopiche dei costituenti della materia. Dato che questo legame fra mondo microscopico e mondo macroscopico poteva essere dimostrato, si doveva dunque essere in grado di poter esprimere quantitativamente le leggi della termodinamica nel linguaggio del microcosmo.

In effetti, la teoria a cui pervenne Boltzmann, denominata *meccanica statistica*, è in pratica la formulazione dal punto di vista microscopico della termodinamica classica, basata invece su grandezze macroscopiche. La meccanica statistica è riconosciuta come uno dei maggiori risultati teorici della fisica del XIX secolo e trova applicazione in moltissimi campi della scienza e della tecnica. Per questo motivo, la formula fondamentale della meccanica statistica è incisa, come epitaffio, sulla lapide che indica la tomba di Boltzmann, nel cimitero centrale di Vienna.

Dopo aver parlato nel precedente capitolo dei princìpi della termodinamica, passiamo ora a introdurre il concetto di *temperatura*, tentando una trattazione qualitativa che però non faccia perdere il sapore del rigore metodologico.

Cominciamo dunque con il definire la temperatura, grandezza fondamentale per la termodinamica in quanto *variabile indipendente*, cioè variabile rispetto alla quale si misurano le altre grandezze e le loro variazioni.

Il metodo più semplice e immediato per distinguere i corpi caldi dai corpi freddi è quello di toccarli, cioè di usare il senso del tatto. In questo modo si stabilisce, in maniera grossolana, se un corpo è più caldo o più freddo di un altro. Questo procedimento, però, non ha niente di quantitativo perché si basa sulla sensazione di calore che è qualitativa e profondamente soggettiva.

Il filosofo empirista John Locke (1632-1704), nel 1690, suggerì un facile esperimento per evidenziare la soggettività della sensazione di calore e la conseguente fallacità di un metodo di misura della temperatura basato su di essa.

Proviamo a immergere la mano destra in una bacinella con acqua calda e la sinistra in una bacinella con acqua fredda. Dopo un po' di tempo, si immergono entrambe le mani in un terzo contenitore che contiene acqua tiepida (quantitativamente vedremo che ciò significa a una temperatura intermedia alle precedenti). Alla mano destra quest'acqua sembrerà fredda, mentre l'opposto accadrà alla mano sinistra che percepirà una netta sensazione di caldo, nonostante entrambe le mani siano immerse nello stesso contenitore.

La nostra percezione tattile nei riguardi della sensazione di calore è quindi piuttosto rozza e il nostro giudizio sulla temperatura di un corpo può essere anche notevolmente errato.

Se a queste considerazioni aggiungiamo il fatto che, in ogni caso, l'intervallo di temperatura a cui il nostro tatto può operare è piuttosto ristretto (pena la sensazione di dolore sia verso le basse che verso le alte temperature e la conseguente non linearità della risposta allo stimolo), è naturale considerare necessario, per misure oggettive e quantitative di temperatura, uno strumento apposito: il *termometro*. Prima di introdurre la misura della temperatura, occorre capirne il concetto e procedere poi a una

sua definizione operativa.

Prendiamo due corpi A e B, il primo che al tatto sembri freddo e il secondo che sembri caldo. Ponendoli a contatto ci accorgeremo che dopo un certo intervallo di tempo (che può essere anche molto lungo), sia A sia B sembreranno alla stessa temperatura.

Quando due corpi A e B si trovano in questa condizione si dice che sono all'*equilibrio termico*. In generale si dice che due corpi sono in equilibrio termico se, posti a contatto, il sistema risultante è in equilibrio termico.

Un modo semplice per verificare se due corpi A e B sono in equilibrio termico consiste nell'impiegarne un terzo, C, come termometro. In pratica si tratta di procedere esattamente come indicato nel principio zero della termodinamica: il corpo C indica, cioè misura, l'uguale temperatura dei corpi A e B, e per questo motivo viene chiamato termometro. In particolare, la temperatura di un sistema è quella proprietà che determina se un sistema è in equilibrio termico o meno con altri sistemi.

Non è banale osservare che l'idea contenuta nel principio zero, per quanto semplice, non è ovvia. Essa esprime il fatto fondamentale che la temperatura di un sistema è una grandezza che tende, dopo un tempo sufficientemente lungo, ad assumere il valore di quella dei sistemi con cui è a contatto.

La nostra esperienza quotidiana ci insegna che effettivamente ciò accade: una bottiglia di bibita estratta dal frigorifero in poco tempo raggiunge la cosiddetta temperatura ambiente, soprattutto quando è molto caldo o è esposta al sole; viceversa, un cibo riscaldato, se tenuto per molto tempo nel piatto, si raffredderà inesorabilmente. Questo perché l'ambiente circostante (in particolare l'aria, ma anche il tavolo, le mani ecc.), a contatto con la bibita fredda o con il cibo caldo, tenderà a portarli alla sua stessa temperatura.

Ma come funziona un termometro?

Abbiamo quindi compreso concettualmente il significato di termometro, ma non ne abbiamo descritto il funzionamento. In effetti, non esiste un

termometro, ma ne esistono tanti e di diverso genere, a seconda delle applicazioni cui sono rivolti e, soprattutto, degli intervalli di temperatura che devono misurare. Il funzionamento dei termometri si basa sull'osservazione che molte proprietà fisiche variano al variare della nostra percezione fisiologica di temperatura: fra queste, la lunghezza di una sbarra (nota come *dilatazione termica*; si veda, per esempio, l'allungamento delle verghe dei binari), il volume di un liquido (il mercurio dei termometri tradizionali ne è una classica applicazione), la resistenza elettrica di un filo, il colore del filamento di una lampada, la pressione di un gas a volume costante o il volume di un gas a pressione costante.

Una qualunque di queste proprietà può essere sfruttata per la costruzione di un *termometro personale*, la cui scala, cioè, non sia tarata ma sia una scala individuale di temperature. Una scala di questo tipo dipende, ovviamente, dalla scelta sia della particolare sostanza termometrica, sia della sua particolare proprietà termometrica scelta come indicatore di temperatura.

A questo punto è possibile definire una scala di temperature in base a una relazione che si *ipotizza* continua e monotòna (attenzione all'accento: in matematica si dicono *monotòne* le funzioni semplicemente crescenti o decrescenti) fra la proprietà termometrica scelta della sostanza impiegata e la temperatura misurata nella suddetta scala personale.

Nel caso del *termometro clinico*, per esempio, la sostanza termometrica è il mercurio (talvolta l'alcol) immerso nel capillare di vetro e la proprietà termometrica è l'altezza della colonna liquida, legata alla variazione di volume del mercurio stesso.

È facile rendersi conto che ogni scelta di sostanza e di proprietà termometrica, insieme con la relazione assunta fra proprietà stessa e temperatura, conduce a una scala specifica di temperature, non necessariamente corrispondente a una qualunque altra scala definita indipendentemente attraverso la scelta di una qualunque altra sostanza o proprietà termometrica.

Per ovviare a questo grave inconveniente, la comunità scientifica internazionale ha dovuto eliminare ogni motivo di confusione nella definizione di temperatura, e questo è stato possibile accordandosi universalmente sulla scelta di una particolare sostanza, di una sua particolare proprietà termometrica e, infine, sulla particolare relazione funzionale che lega le misure di questa proprietà a una scala di temperature, a questo punto da considerarsi campione universale.

Una qualunque altra scala di temperature personale, definita in un qualunque altro modo, può sempre venire tarata sulla scala universale.

Un po' più approfonditamente, ma senza addentrarci in eccessivi tecnicismi, per tarare un termometro occorre scegliere un *punto fisso campione* al quale tutti i termometri devono fornire la stessa lettura di temperatura. A livello internazionale, al X Congresso Generale di Pesi e Misure svoltosi a Parigi nel 1954, è stato scelto il *punto triplo dell'acqua*, cosiddetto per il fatto che coesistono in equilibrio i tre stati fisici dell'acqua: quello solido (ghiaccio), quello liquido e quello aeriforme (vapore d'acqua).

A esso è stata convenzionalmente attribuita una temperatura assoluta di 273,16 K (0,01 °C), allo scopo di mantenere inalterati i valori della scala Celsius corrispondenti ai punti di fusione del ghiaccio (0 °C) e di ebollizione dell'acqua (100 °C).

Come *termometro campione* è stato scelto il termometro a gas a volume costante, in cui la proprietà termometrica è la pressione del gas (generalmente azoto, ossigeno o idrogeno molecolari oppure semplicemente aria) che varia al variare della temperatura (in particolare, aumenta all'aumentare e diminuisce al diminuire: dunque la relazione lineare che lega la pressione del gas alla temperatura è monotòna crescente).

La scala impiegata viene estrapolata da quella del termometro a gas e viene definita così, attraverso una certa relazione, la *temperatura di gas perfetto*, indipendente dal tipo di gas impiegato per la costruzione del termometro, ma dipendente solo dalle proprietà generali dei gas.

Infine, ultimo passo di questo laborioso procedimento di definizione della temperatura, si definisce una *scala termodinamica assoluta delle temperature*, o *scala Kelvin*, assolutamente indipendente anche dalle proprietà generali delle sostanze termometriche impiegate, la quale, nell'intervallo di temperature in cui è possibile impiegare il termometro a gas a volume costante, coincide con la scala a gas perfetto.

L'unità di misura della scala Kelvin è – abbiamo visto – il *kelvin* (indicato con il simbolo K: attenzione, non si legge "gradi kelvin", ma semplicemente "kelvin"): esso definisce l'intervallo unitario di temperatura, in modo che fra la temperatura di fusione del ghiaccio e quella di ebollizione dell'acqua vi siano esattamente 100 K (come pure i ben più noti 100 °C).

La scala assoluta impiega quindi un'unità di misura di temperatura che ha la stessa grandezza di quella della scala Celsius (è perciò anch'essa una scala centigrada).

Si può dimostrare che la scala Kelvin ha uno *zero assoluto* di 0 K, e che non esistono temperature al di sotto di questo valore. Il terzo principio della termodinamica stabilisce che a questo valore di temperatura ci si può avvicinare arbitrariamente, senza però mai raggiungerlo.

Attualmente, la temperatura più bassa ottenuta in laboratorio, e forse nell'Universo, è di qualche miliardesimo di kelvin: a temperature così basse, in quella che potremmo definire la *quiete atomica*, la materia acquista proprietà del tutto nuove e assolutamente inusuali rispetto a quelle che ha a temperature ordinarie. Per questo motivo la fisica delle basse temperature è una branca di ricerca affascinante e piena di spunti originali, anche dal punto di vista delle future applicazioni tecnologiche.

Come lasciato intuire, e come facilmente deducibile dalla comune esperienza, la materia, al variare della temperatura cui è sottoposta, muta anche drasticamente di stato: raffreddando acqua, da liquida la vedremo diventare ghiaccio, viceversa, riscaldandola, otterremo tutto vapor d'acqua.

Non tutti i termometri, perciò, vanno bene per misurare qualunque

temperatura. Per esempio, non potremmo certo mai usare un termometro a colonnina di mercurio per valutare la temperatura all'interno di un altoforno o di un criostato (termostato per basse temperature).

Quello che si fa, allora, è determinare sperimentalmente altri punti fissi, oltre al già citato punto triplo dell'acqua, distribuiti su un ampio spettro di temperature, in modo da poter tarare successivamente altri termometri sulla scala del termometro campione. In questa maniera, avendo indicati i tipi di strumento più adatti per interpolare fra i vari punti fissi ed estrapolare al di sopra dei punti estremi, è possibile costruirsi scale termometriche approssimate, ma la cui differenza fra due punti fissi è, rispetto alla scala Kelvin, usualmente trascurabile.

La Scala Internazionale di Temperature così ottenuta è diventata di uso legale in quasi tutti i Paesi del mondo. Pensate a quanto lavoro hanno fatto i fisici per permettervi di valutare in maniera quantitativa se vostro figlio ha o meno la febbre!

Le mille bolle blu

Vi siete mai chiesti quante bollicine si formano in una coppa di spumante appena riempita? La risposta è: circa 5 milioni. Tante sono, infatti, mediamente, le piccole sferette di anidride carbonica che, originandosi dal fondo e dalle pareti del bicchiere, salgono fino alla superficie per esplodere e rilasciare nell'aria i tipici aromi di questo vino frizzante.

L'effetto non è solo spettacolare dal punto di vista visivo, ma anche funzionale, perché chi produce i vini sa bene che, per giudicarne la qualità, l'aspetto olfattivo è di fondamentale importanza. Doveva saperlo bene anche Dom Pierre Pérignon, abate benedettino cieco che due secoli fa ideò il metodo per rendere effervescente una bevanda alcolica. Forse fu grazie alla sua cecità che l'abate sviluppò i sensi dell'olfatto e del gusto a tal punto da ottenere un vino spumante entrato nella leggenda anche per le sue finissime bollicine: lo *champagne*.

Proprio per esaltare la sensazione olfattiva e per impedire una fuga

eccessiva di bollicine, il bicchiere migliore per gustare *champagne* o spumanti nostrani è la *flûte*, alto e affusolato, e non la coppa (modellata secondo la leggenda sui seni di Madame de Pompadour, amante di Luigi XV), dall'apertura troppo larga.

I sottili treni di bolle dello spumante partono come detto dal fondo del bicchiere. Ma da dove sbocciano? Curiosamente, il loro punto di origine sta nelle imperfezioni del bicchiere e, soprattutto, negli eventuali residui di pulitura o asciugatura (piccole fibre, granelli di polvere). È da questi punti che fungono da centri di aggregazione dell'anidride carbonica disciolta nel liquido che nasce la bollicina. La microscopica tasca di gas – che all'inizio ha una dimensione di una frazione di millesimo di millimetro – si allarga con l'ingresso di altro gas disciolto, fino a quando diventa più leggera del liquido circostante. In quel momento si stacca dal bicchiere e inizia a galleggiare fino alla superficie, aumentando ancora le proprie dimensioni – fino ad avere un diametro di qualche millimetro – via via che altra anidride carbonica si aggiunge lungo il percorso.

Spumanti, birre, vini frizzanti sono tutti accomunati dalla presenza di anidride carbonica disciolta che dà al liquido la particolare caratteristica di frizzare. Non solo da questa, però, dato che oltre ad alcol e gas contengono anche diversi composti organici che possono funzionare da *agenti attivi di superficie*, ovvero da *surfattanti* (dall'inglese *surface active agent*), noti anche con il nome di *tensioattivi*.

I surfattanti, generalmente molecole proteiche, hanno un'estremità idrofila, cioè solubile in acqua, e l'altra idrofoba, cioè insolubile in acqua. Così, quando all'interno di un liquido acquoso si formano delle bolle di gas, i surfattanti tendono spontaneamente a raccogliersi sulla superficie delle bolle, con la coda idrofoba rivolta verso l'interno della bolla (dove non è più a contatto con l'acqua, ma con il gas), e la testa idrofila ancora immersa nell'acqua.

È proprio dalla concentrazione di molecole surfattanti e dal loro tipo che dipende la diversa dinamica delle bollicine (maggiore o minore diametro, più o meno veloci, tendenza a formare una schiuma superficiale) nelle

varie bibite frizzanti.

I surfattanti sono importanti anche per un altro tipo di bolle: quelle di sapone. Infatti, oltre a essere i responsabili delle capacità pulenti e sgrassanti di un sapone (è l’estremità idrofoba che si attacca allo sporco, portandolo via), i surfattanti permettono a una bolla di sapone di acquistare un certo volume e di resistere per un po’ di tempo.

Avete mai provato a fare una bolla di sola acqua? Tutti sanno che non è possibile.

Il motivo principale è la tensione superficiale, ovvero la forza intermolecolare che crea alla superficie una sottile pellicola di acqua. Per rompere questa pellicola occorre una certa forza: ecco perché alcuni insetti camminano sull’acqua. Le loro zampe, ricoperte di una sostanza oleosa, non vengono bagnate dall’acqua: possono così premere sulla pellicola d’acqua creata dalla tensione superficiale senza forarla. La pellicola si deforma leggermente e sostiene l’insetto.

La tensione superficiale dell’acqua è troppo forte perché possa formarsi una bolla. Il sapone serve proprio ad allentare questa forza, abbassandola fino a circa un terzo di quella originaria.

Con la tensione superficiale della miscela di acqua e sapone così ridotta, diventa possibile stirare la pellicola superficiale fino a farle assumere una certa dimensione: tutto dipende da quanto surfattante è presente nell’acqua e dall’intensità con cui si stira la pellicola (ovvero dalla forza del soffio). I surfattanti impediscono inoltre che l’acqua catturata nella pellicola evapori rapidamente, prolungando così la sopravvivenza di una bolla di sapone.

Ma come si forma una bolla?

Tipicamente, una bolla di sapone si forma quando si soffia aria su una lamina saponata: il motivo per cui si formano bolle sferiche è legato al fatto che l’energia della lamina saponata è essenzialmente dovuta alla tensione superficiale, proporzionale all’area della superficie della lamina.

Il sistema fisico *bolla di sapone* tende così da un lato a catturare la bolla d’aria al suo interno e dall’altro a minimizzare l’energia presente, ovvero a rendere minima la superficie esterna. E la forma sferica ha proprio questa

caratteristica: a parità di volume, la sfera è il solido con superficie minima.

Lo studio delle bolle di sapone rientra nel settore della matematica detto *calcolo delle variazioni*. In pratica si tratta di trovare, nel caso delle lamine saponate, qual è la forma di minima energia tra tutte quelle che si ottengono variando un poco la forma della lamina. Un esperimento tipico è quello di prendere un telaietto di metallo, immergerlo nell'acqua saponata, ritirarlo fuori e osservare quale forma ha fatto l'acqua saponata.

Per esempio, se si immerge nell'acqua saponata una circonferenza, si ottiene un cerchio di sapone attaccato alla circonferenza: che naturalmente è la migliore soluzione possibile. È il cosiddetto *problema di Plateau*, dal nome del fisico belga Antoine Ferdinand Plateau (autore, nel 1873, del primo studio sull'argomento e scopritore del fatto che le lamine saponate formano angoli solo di 120° o di 109° 28'), risolto nel 1958 dal matematico italiano Ennio De Giorgi.

Ma non esistono solo le bolle. Talvolta nei liquidi possono formarsi anche *antibollicine*. Non è fantascienza. Un'antibolla è costituita da una sottile pellicola di aria frapposta fra due volumi di liquido. Attenzione, quindi: mentre un'ordinaria bolla di gas immersa in un liquido è un volume di gas circondato dal liquido stesso, un'antibolla ha il liquido sia dentro sia fuori.

Antibolle si possono formare combinando due liquidi non miscibili, ma anche nell'acqua, quando una goccia poggia sulla superficie attraverso un sottile cuscino d'aria che la accompagna nell'immersione.

Come riconoscere un'antibolla? A differenza delle bolle gassose, che sono nettamente più leggere del liquido circostante e quindi salgono molto rapidamente in superficie, le antibolle sono pesanti e, a seconda che il liquido che contengono sia più o meno denso di quello che le circonda, possono salire molto lentamente o addirittura affondare.

L'interesse per le antibolle è tutt'altro che ozioso. Nelle centrali nucleari, per esempio, esistono dei dispositivi di conteggio delle bolle nelle tubature degli impianti di raffreddamento: questi conteggi permettono di valutare il rapporto aria/acqua e l'effettiva capacità di raffreddamento del liquido.

Ma se, oltre alle bolle, ci sono anche delle antibolle, il rapporto aria/acqua diminuisce. E una stima errata di questo valore può mettere a rischio i sistemi di controllo. Ecco perché è bene sapere riconoscere un'antibolla.

Dalla bolla alla schiuma

Quando tante bolle di gas si raccolgono insieme, si ottiene una *schiuma*. In effetti, la schiuma è una dispersione di bolle di gas in un liquido contenente molecole attive di superficie (surfattanti). Sono proprio queste a determinare la tendenza di un liquido a schiumare e la stabilità della schiuma risultante: basta pensare alla differenza fra la densa schiuma che formano alcune birre, ricche di surfattanti, e quella degli spumanti, più poveri di questi composti.

Esistono tante schiume: da quelle saponose, come la schiuma da barba, a quelle alimentari, come la panna montata o la schiuma del cappuccino.

Un aspetto curioso delle schiume è che se la frazione di volume di liquido è maggiore del 5 per cento, le bolle sono praticamente sferiche, mentre schiume più secche hanno bolle di forma poliedrica, causata dall'equilibrio fra la tensione superficiale e le forze intersuperficiali.

Ma siamo circondati anche da schiume solide che si formano quando il liquido catturato dai surfattanti si solidifica. Alcuni esempi? Il pane, la pietra pomice, il polistirolo, le nostre ossa.

Senza schiume la nostra vita sarebbe sicuramente diversa.

Anatomia di una bolla

La sottile pellicola che costituisce la superficie di una bolla di sapone è formata da due strati di surfattanti presenti nel sapone che intrappolano, al loro interno, uno strato di molecole di acqua. Le molecole di surfattante sono molecole organiche, in genere proteiche, composte essenzialmente di atomi di idrogeno e di carbonio che costruiscono una "testa" idrofila, e una o più "code" idrofobe. Le molecole di surfattanti, quindi, immergono la loro testa idrofila nello straterello d'acqua e la coda idrofoba rivolta verso l'aria. In questo modo diminuiscono la tensione

superficiale dell'acqua permettendo di allungare la pellicola di liquido.
Le forze elettrostatiche attive fra le molecole di surfattante e fra queste e le molecole d'acqua sono tali da rendere la superficie di una bolla flessibile e permeabile al gas. Per questo motivo, le bolle possono essere deformate senza rompersi, e le bollicine dello spumante possano ingrandirsi nella loro salita verso la superficie, arricchendosi di gas man mano che salgono.

La bolla di sapone perfetta

Qual è la ricetta per fare una bella bolla di sapone? Acqua e, naturalmente, sapone. Già, ma quale sapone? E quanto? Una buona ricetta è: una tazza di detersivo per piatti, 1 l d'acqua e mezzo cucchiaio di glicerina (si acquista in farmacia), che serve a rendere più resistente la bolla e ad aumentarne il diametro.

Infatti al composto, oltre alla base sapone-acqua, si può aggiungere per esempio, zucchero, miele o, appunto, glicerina. Lo scopo di miscelare sostanze aggiuntive al composto base acqua-sapone è quello di limitare l'evaporazione dell'acqua, aumentando così la resistenza e la durata delle bolle create.

La ricerca di una miscela per bolle resistenti richiede spesso molto tempo e costante impegno, e infatti è raro trovare un artista di bolle di sapone disponibile a rendere pubblica la propria ricetta segreta.

Per ora, il record per una bolla sferica a base di acqua, sapone e glicerina secondo la ricetta citata sopra è pari a 2,3 m di circonferenza, anche se il record di bolla più grande del mondo è detenuto da una sfera di sapone di ben 35 m di circonferenza!

Con un'altra ricetta, invece, si possono ottenere bolle che durano per mesi (a patto di averne cura). Una bolla fatta con tre parti uguali di acqua, soluzione commerciale per bolle e glicerina è arrivata a durare addirittura 342 giorni!

Le bolle di sapone sono presenti anche nell'arte. La prima bolla di sapone compare nel 1595, a opera del pittore olandese Hendrick Goltzius; nella pittura fiamminga la bolla è simbolo di fragilità della vita umana, ma è anche vista come un gioco di bambini. Forse è stata proprio la diffusione

del gioco ad attrarre gli scienziati, primo fra tutti Newton, a studiare colori e forme delle lamine saponate.

Le bolle intanto proseguirono il loro cammino nell'arte diventando protagoniste di celebri quadri di Jean-Baptiste-Siméon Chardin e di Édouard Manet. Poi arrivò la pubblicità e, infine, le *Mille bolle blu*, la famosa canzone di Mina, anch'essa impiegata, anni dopo la sua registrazione, per pubblicizzare saponi e bagnischiuma.

Tutti sotto la doccia!

Quando siamo sotto la doccia, una miriade di gocce d'acqua ci cade addosso, dandoci quella straordinaria sensazione di benessere. Ma perché si formano le gocce d'acqua? E davvero sono tutte perfettamente sferiche?

Per rispondere a queste domande occorre approfondire brevemente il tema della *tensione superficiale*, già toccato di passaggio affrontando lo studio delle bolle di sapone. Infatti, le gocce d'acqua, come le bolle di sapone o anche le sferette di mercurio, sono caratterizzate da una superficie di separazione fra il liquido – acqua, acqua saponata, mercurio – e un altro mezzo, che in questi esempi è l'aria, ma che potrebbe essere anche un solido o un altro liquido.

Per studiare tutti quei fenomeni che avvengono al confine fra un liquido e un'altra sostanza è comodo considerare la superficie di separazione del liquido come una pellicola elastica, ovvero come una membrana messa sotto tensione.

Osservata sotto questo punto di vista, la tensione superficiale non è altro che una misura del grado di elasticità di questa pellicola.

Ogni liquido è caratterizzato da un certo valore di tensione superficiale, che però dipende dalla temperatura. In generale, la tensione superficiale diminuisce all'aumentare della temperatura: così, per esempio, l'acqua a 0 °C ha una tensione superficiale maggiore di quasi il 30 per cento dell'acqua a 100 °C.

Se nel processo di formazione delle gocce ci fosse in gioco solo la

tensione superficiale, queste sarebbero tutte perfettamente sferiche, in quanto la forma sferica è quella che per un dato volume ha la superficie minore e corrisponde quindi allo stato di minore energia. Nella realtà, però, quando le gocce cadono staccandosi dalla doccia hanno una forma più o meno allungata, mentre quando sono in volo assumono una forma leggermente schiacciata.

Tutto questo accade a causa dell'azione della forza di gravità e della resistenza dell'aria. Così, solo le gocce più piccole riescono a mantenere la loro forma sferica.

La tensione superficiale è una manifestazione macroscopica delle forze di reciproca attrazione intermolecolare che sono sempre presenti fra le molecole di un liquido. Queste forze, dette *di coesione*, sono di natura elettrostatica e fanno sì che le molecole siano, a seconda del liquido in esame, più o meno legate fra loro: è appunto questo legame fra molecole, più o meno intenso, a manifestarsi sotto forma di tensione superficiale.

Proviamo a capire meglio il concetto considerando un liquido in un contenitore, per esempio una certa quantità d'acqua in un bicchiere. Le molecole di acqua completamente immerse sotto la superficie sono tutte circondate da altre molecole di acqua, mentre quelle che si trovano in superficie hanno un lato a contatto con l'aria sovrastante il bicchiere. Perciò queste sentono una forza netta diretta verso l'interno proprio perché richiamate dalle forze di coesione delle molecole sottostanti. Tanto maggiore è questa forza, tanto più grande sarà la tensione superficiale, ovvero la tensione della pellicola superficiale del liquido.

Quando una goccia di liquido arriva a contatto con una superficie solida, oltre alle forze di coesione entrano in gioco anche le cosiddette *forze di adesione*, ovvero quelle forze di attrazione elettrostatica che esercitano reciprocamente le molecole di liquido e quelle del solido considerato.

Il rapporto fra le forze di adesione e quelle di coesione ha importanti implicazioni e applicazioni, non solo in fisica. A questo rapporto, per esempio, è dovuto il fenomeno della *capillarità*, ovvero la capacità dell'acqua e di altri liquidi di risalire verticalmente lungo tubi di sezione

molto sottile, vincendo la forza di gravità.

Provate a guardare la forma della superficie libera dell'acqua contenuta in un bicchiere di vetro. Scoprirete che questa non è perfettamente piana, ma è incurvata ai bordi, ovvero presenta una leggera curvatura, diretta verso l'alto: forma, cioè, quello che i fisici chiamano *menisco concavo*.

Quando nei liquidi posti a contatto con una superficie solida si osserva la formazione di un menisco concavo, significa che le forze di adesione prevalgono su quelle di coesione. È appunto il caso dell'acqua con il vetro.

L'effetto di curvatura è ancora più marcato se il contenitore si fa via via più stretto ed è facilissimo da osservare nei colli delle bottiglie o anche nelle cannucce trasparenti.

Ora, quando fra un liquido e un solido si verificano le condizioni sopra descritte, cioè quando l'adesione del liquido al solido vince la coesione fra le molecole del liquido, le forze intermolecolari fra la parete verticale del contenitore solido e la pellicola elastica del liquido sono tali da permettere al liquido di alzare il proprio livello per un certo tratto.

In particolare, in un tubicino di vetro di sezione capillare (capillare significa sottile come un capello; tubi capillari tipici hanno sezioni di pochi decimi di millimetro) l'acqua sale fino a una certa altezza, in misura inversamente proporzionale al diametro del tubicino, e la superficie libera del liquido ha una forma concava molto marcata, in cui il livello del liquido a contatto con le pareti è a una quota superiore rispetto a quello che si trova al centro del tubicino.

Il fenomeno della capillarità per esempio è responsabile della risalita dell'acqua dalle radici alle foglie lungo i tronchi di piante e alberi, ma anche, tornando a questioni domestiche, dell'assorbimento dell'acqua da parte degli asciugamani e della carta assorbente o dell'ammorbidirsi di un biscotto inzuppato nel caffelatte.

Carta assorbente e biscotto infatti sono solidi porosi, all'interno dei quali si trova una fitta rete di tubi capillari. Sempre per capillarità il sangue, pompato dal cuore, riesce a diffondersi in tutto il corpo, richiamato proprio dai vasi capillari, ovvero da quella fitta e intricata rete di vasi sanguigni

sottilissimi che permeano ogni organo e tessuto del nostro corpo.

Anche la scrittura con la penna stilografica si avvale delle proprietà di capillarità dell'inchiostro nel mezzo poroso rappresentato dalla carta: infatti sono le singole microcavità presenti sulla superficie cartacea a "risucchiare" l'inchiostro dal pennino, proprio in virtù delle forze di adesione superficiale che si manifestano fra l'inchiostro stesso e la carta.

Per questo motivo non tutte le carte sono buone per la scrittura con la penna stilografica: una carta troppo spugnosa assorbe eccessivamente l'inchiostro, il quale si espande lasciando un tratto poco nitido, mentre una carta non porosa, come quella plastificata, non può assorbire l'inchiostro, rendendo impossibile l'impiego della penna.

Ma che cosa accade se le forze di coesione sono maggiori di quelle di adesione? Esattamente il contrario di quanto abbiamo visto finora.

Un esempio di sostanza che si comporta in maniera completamente diversa dall'acqua è il mercurio, il metallo liquido impiegato nei termometri clinici. Il mercurio, infatti, ha una tensione superficiale molto maggiore di quella dell'acqua e, a differenza di quest'ultima, quando viene versato in un contenitore di vetro, la sua superficie libera prende la forma di *menisco convesso*, con il mercurio al centro a una quota maggiore del mercurio a contatto con le pareti del contenitore. E questo avviene proprio in virtù del fatto che le forze di coesione fra gli atomi del metallo sono maggiori di quelle di adesione mercurio-vetro.

Se una volta vi si è rotto un termometro, vi sarete immediatamente accorti che il mercurio, uscendo dalla colonnina di vetro, forma delle gocce praticamente sferiche di varie dimensioni che rotolano sul pavimento, mentre è esperienza comune osservare che le gocce d'acqua si spandono sulla superficie su cui cadono. In altre parole, la maggiore tensione superficiale del mercurio fa sì che questo liquido non bagni il pavimento, mentre l'acqua è invece un liquido che bagna.

La *bagnabilità* è una proprietà caratteristica per ciascuna coppia liquido-solido. Esistono infatti sostanze solide che non vengono bagnate dall'acqua: una di queste è la cera.

Tutte le casalinghe sanno benissimo che per eliminare lo strato di cera stesa sul pavimento per dare l'effetto di lucidità occorrono detersivi e solventi molto aggressivi. Il motivo è presto detto: perché la cera possa essere bagnata dall'acqua, occorre aggiungere a quest'ultima proprio quei tensioattivi di cui abbiamo parlato quando abbiamo studiato le bolle di sapone.

Così, con i tensioattivi che abbassano la tensione superficiale dell'acqua, questa può finalmente bagnare la cera e collaborare attivamente alla sua rimozione.

I lavandini di Coriolis

Siamo appena usciti da un bagno ristoratore in vasca, magari accompagnato da un rilassante idromassaggio. Stiamo ancora indossando l'accappatoio, quando stappiamo la vasca per svuotarla della grande quantità di acqua che contiene. Mentre ci asciughiamo i capelli, non ci sfugge il fatto che l'acqua si incanala verso il tubo di scarico, formando un vortice che si avvolge attorno al foro di uscita.

In che verso sta ruotando? Ruota sempre nello stesso senso? Da che cosa dipende questo verso di rotazione?

Queste domande sono tutt'altro che oziose. Su molti testi di fisica si legge infatti che i vortici di acqua che si creano quando si stappa un lavandino o una vasca hanno un verso di rotazione privilegiato a seconda del luogo del Pianeta in cui ci troviamo.

In particolare, se ci troviamo nell'emisfero boreale, ovvero a nord dell'equatore, i vortici dovrebbero girare in senso antiorario, mentre se ci troviamo nell'emisfero australe, questi dovrebbero avvolgersi in verso orario attorno al foro.

Ma accadrà veramente così? L'unico modo è sperimentarlo, ma prima cerchiamo di capire se succede e per quale motivo.

Secondo i sostenitori del vortice rotante con verso privilegiato, la causa di questo fenomeno sarebbe da attribuire alla *forza di Coriolis*, un tipo di

forza molto speciale che si manifesta solo in determinate circostanze. Forza speciale, determinate circostanze: sembra davvero misteriosa, questa forza di Coriolis che prende il nome da Gustave Gaspard de Coriolis (1792-1843), il fisico francese che per primo la descrisse nel 1835.

In realtà gli scienziati sanno benissimo di che cosa si tratta, ma per capirla bene, occorre procedere per gradi.

Inerziale o non inerziale?

I fisici amano distinguere i luoghi di osservazione dei fenomeni in due categorie ben distinte: quelli fermi (in quiete) o in moto rettilineo uniforme, e quelli che si muovono di moto accelerato. I primi vengono tecnicamente chiamati *sistemi di riferimento inerziali*, mentre i secondi sono detti *non inerziali*.

Il perché di questi nomi è presto detto. Per descrivere un qualunque fenomeno, prima occorre sempre definire una cornice da cui vogliamo osservarlo e in cui questo si realizza: per esempio, il moto di una nave possiamo descriverlo standofermi sul molo, da dove avremo determinati punti di riferimento (il faro, l'ingresso del porto, l'estremità del molo) o salendo a bordo, da cui avremo punti di riferimento diversi.

La cornice, dunque, è il sistema di riferimento selezionato per inquadrare il fenomeno e poterlo descrivere in maniera quantitativa.

Dal punto di vista matematico, un sistema di riferimento è definito da 3 assi perpendicolari fra loro che individuano le 3 direzioni dello spazio (alto-basso, destra-sinistra, davanti-dietro) e che s'intersecano tutti in un punto detto *origine*.

Un corpo in movimento – la nave, una mosca, una sonda spaziale – cambia la propria posizione nel tempo, ovvero, in altre parole, modifica le proprie coordinate spaziali. La linea che descrive come cambiano le coordinate spaziali di un corpo in moto con il passare del tempo si chiama *traiettoria*, e può essere una retta, una curva, una spezzata chiusa (come le orbite dei pianeti) oppure aperta (come la parabola percorsa da una palla) e così via.

Un sistema di riferimento in quiete o in moto rettilineo uniforme – ovvero che si muova a velocità costante lungo una linea retta – viene detto *inerziale* perché in esso vale il cosiddetto *principio d'inerzia* secondo cui un corpo permane nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme se non intervengono forze esterne a modificarne la condizione.

Per tutti gli osservatori posti in sistemi di riferimento inerziali, detti quindi *osservatori inerziali*, le leggi fisiche sono invarianti, mantengono cioè inalterata la loro forma.

Un osservatore non inerziale, invece, descrive in generale un fenomeno in maniera diversa non solo da tutti gli osservatori inerziali, ma anche da un qualunque altro osservatore non inerziale che non sia solidale con lui, ovvero che non si muova esattamente alla stessa maniera.

Infatti, per rendere conto del moto osservato, un osservatore non inerziale deve sempre invocare la presenza di forze che invece non sono necessarie all'osservatore inerziale per la sua descrizione.

Per questo motivo, proprio perché non sono reali, ma dipendono soltanto dalla scelta del sistema di riferimento, queste forze sono dette *fittizie* o *apparenti*.

Un esempio di forza apparente lo sperimentiamo quotidianamente quando andiamo in auto: ogni volta che sterziamo, sentiamo infatti una forza che ci spinge verso l'esterno della curva. È la *forza centrifuga*, l'esempio più noto di forza apparente che "appare" proprio perché in quel momento ci troviamo solidali con un sistema di riferimento non inerziale (l'auto in movimento che segue una traiettoria curva). Chi ci osserva dal marciapiede non ha invece alcuna necessità di inserire la forza centrifuga nella descrizione del nostro moto.

L'auto in curva è un particolare sistema di riferimento in rotazione attorno a un asse esterno che, in questo caso, è dato da un asse verticale passante per il centro della curva.

Tutti i sistemi di riferimento in rotazione, anche uniforme – ovvero con velocità angolare costante –, come le piattaforme rotanti, le sedie girevoli, le giostre, sono un'importante classe di sistemi di riferimento non inerziali.

Fra questi troviamo naturalmente anche la Terra. Il nostro pianeta, infatti, ruota su se stesso a una velocità angolare costante pari a un giro completo ogni 24 ore circa (in realtà, la velocità di rotazione della Terra è in lentissima ma costante diminuzione), così che noi siamo forzatamente osservatori non inerziali.

Questo fatto lo possiamo evidenziare con alcuni semplici esperimenti. Per esempio pesandoci all'equatore e ai poli, o comunque a due latitudini diverse. A causa della rotazione della Terra, infatti, all'equatore – insieme dei punti più distanti dall'asse di rotazione – la forza centrifuga è maggiore di quella misurata in ogni parte del globo, mentre ai poli, ovvero esattamente sull'asse di rotazione, la forza centrifuga si annulla.

L'intensità della forza centrifuga aumenta infatti con il quadrato della velocità lineare, ed essendo la crosta terrestre un corpo rigido, la velocità lineare – rispetto alle stelle – all'equatore raggiunge il suo valore massimo, pari a circa 465 m al secondo, o 1674 km all'ora!

Così, se fossimo all'equatore ci troveremmo un po' più leggeri che se ci trovassimo a qualunque altra latitudine, perché la forza centrifuga è massima ed esattamente opposta alla forza di gravità.

Ai poli, invece, il nostro peso avrebbe il valore più alto, perché la forza di gravità non è contrastata da alcuna forza centrifuga.

L'effetto è piccolo, per la verità, ma è perfettamente misurabile: la riduzione di peso all'equatore è pari al 3,46 per cento del peso misurato ai poli. In altre parole, un uomo di 80 kg effettivi, all'equatore pesa circa 275 g di meno. Un alleggerimento non trascurabile… ma non è propriamente una dieta dimagrante!

Per completezza, occorre dire che nel calcolo non abbiamo tenuto conto di un altro fattore di "appesantimento" al polo, dato dal fatto che la Terra non è perfettamente sferica, ma leggermente schiacciata ai poli. Ai poli, quindi siamo più vicini al centro della Terra, ragione per cui la forza di gravità è maggiore.

La forza centrifuga la sentiamo anche se stiamo fermi sulla superficie

terrestre perché tanto è la Terra a trascinarci con lei nel suo moto, ma se cominciamo a muoverci, sentiremo anche una nuova forza fittizia agire su di noi: è, appunto, la forza di Coriolis, da cui abbiamo iniziato tutto il nostro ragionamento. Il suo effetto, noto con il nome di *effetto Coriolis*, si manifesta come uno spostamento rispetto alla direzione originale del moto ed è di fondamentale importanza in molti campi, fra cui la balistica, i trasporti e la meteorologia.

Gli artiglieri navali e quelli che si occupano del lancio di missili balistici sanno benissimo di dover tenere in considerazione l'effetto Coriolis, altrimenti rischiano di mancare il bersaglio.

Nell'emisfero boreale, cioè a nord dell'equatore, un missile lanciato in direzione nord-sud o sud-nord, ovvero in senso longitudinale rispetto alla direzione di rotazione della Terra, verrà infatti spostato verso destra proprio dalla forza di Coriolis.

Lo stesso missile, lanciato sempre in direzione longitudinale, ma nell'emisfero australe, vedrà invece la sua traiettoria deviata verso sinistra. In pratica, quella di Coriolis è una forza apparente che si manifesta trasversalmente alla direzione di moto.

L'effetto si può spiegare molto semplicemente in termini di anticipo o di ritardo rispetto alla rotazione della Terra.

Consideriamo per semplicità un missile lanciato dall'equatore verso nord lungo un meridiano. Spostandosi in latitudine, il missile raggiunge via via punti in cui la velocità lineare del Pianeta è inferiore a quella che si ha all'equatore.

Per questo motivo, considerato che la Terra ruota da ovest verso est, si troverà sempre più in anticipo rispetto ai punti del meridiano lungo il quale è stato lanciato, ovvero a destra – a est, quindi – rispetto a questi. Analogamente, un missile lanciato dal polo Nord verso sud lungo un meridiano si troverà in ritardo rispetto ai punti del meridiano: lo troveremo quindi ancora a destra – a ovest, questa volta – rispetto al meridiano stesso.

L'identico ragionamento si può applicare all'emisfero australe, scoprendo che qui, come detto, la forza di Coriolis agisce deviando il

missile verso sinistra, ovvero verso est se si muove dall’equatore al polo Sud, verso ovest se si muove in direzione opposta.

Che tempo che fa

Applicato ai moti a grandi scale delle masse d’aria in atmosfera, l’effetto Coriolis spiega come si formano i cicloni e gli anticicloni e, soprattutto, dice in quale verso girano a seconda dell’emisfero in cui si manifestano.

Tutti sappiamo che il vento si muove dalle aree ad alta pressione verso quelle a bassa pressione.

Se ci troviamo nell’emisfero boreale, la direzione del vento dall’area a bassa pressione B verso quella ad alta pressione A verrà deviata verso destra dalla forza di Coriolis, costringendo quindi il vento a ruotare in senso antiorario attorno all’area B: siamo quindi in presenza di un ciclone, ovvero un’area a bassa pressione, circondata da una regione di alta pressione, nella quale l’aria è soggetta a un sistema di venti circolanti in senso antiorario (ma è comunque sempre presente una componente radiale del moto, convergente verso il centro del ciclone, il cosiddetto *occhio*).

Lo stesso ragionamento, applicato all’emisfero australe, ci porta a concludere che i venti che circolano nei cicloni di quell’emisfero si avvolgono in senso orario attorno alla regione a bassa pressione.

A differenza dei cicloni che a volte hanno conseguenze catastrofiche (in particolare quelli tropicali), gli anticicloni sono noti soprattutto perché sono tipicamente forieri di bel tempo. Un anticiclone, infatti, è una zona di alta pressione al cui interno i venti soffiano debolmente – spesso a regime di brezza – muovendosi in senso orario nell’emisfero boreale e antiorario in quello australe.

Un anticiclone particolarmente importante per il clima del nostro Paese è il famoso anticiclone delle Azzorre (dal nome dell’arcipelago dell’oceano Atlantico su cui si forma) che in estate arriva a estendersi anche per tutto il bacino del Mediterraneo, mantenendo condizioni prolungate di bel tempo.

Per concludere questi brevi cenni relativi all’applicazione della forza di Coriolis in meteorologia, citiamo la *legge di Buys Ballot* che prende il

nome da Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot (1817-1890), il meteorologo olandese che nel 1857 ne fornì per primo una giustificazione empirica.

Espressa in maniera molto semplice, essa dice che, una volta individuata la direzione del vento, è possibile trovare le zone di alta e bassa pressione da cui ha origine. In particolare, nell'emisfero boreale, poiché il vento soffia in verso antiorario attorno all'area di bassa pressione, questa si troverà alla nostra sinistra, se ci mettiamo con le spalle al vento. L'area di alta pressione sarà quindi a destra. Nell'emisfero australe, naturalmente, si verifica la situazione opposta.

La legge di Buys Ballot ha una validità approssimata, perché non tiene conto degli eventuali ostacoli naturali o artificiali che possono deviare il corso del vento, ma in alta quota o in mare aperto si può applicare senza problemi. Adesso non sarete esperti meteorologi, ma potrete comunque divertirvi a capire come si muove il vento e perché.

E adesso torniamo all'osservazione della vasca da bagno da dove siamo partiti.

Il vortice di acqua diretta verso lo scarico si fa sempre più veloce, via via che il livello dell'acqua diminuisce, rendendo più evidente il senso di rotazione: basta mettere nell'acqua un qualunque oggetto galleggiante di piccole dimensioni per osservarlo con chiarezza.

Questo però non dipende dalla forza di Coriolis; non perché non sia presente l'effetto, tutt'altro, ma perché è sicuramente trascurabile rispetto ad altre cause in grado di alterare il verso di rotazione del vortice di acqua.

Eccone alcune: la geometria della vasca o del lavandino, la forma del foro di scarico, la presenza nell'acqua di eventuali moti ondosi o vorticosi precedenti o causati dall'azione di stappatura, eventuali correnti d'aria sul pelo dell'acqua, ma anche le vibrazioni indotte nell'edificio dal passaggio di un mezzo pesante.

Questo significa che non è possibile evidenziare l'effetto Coriolis in casa?

È difficile, ma potete comunque tentare. Prendete una vasca a fondo

piatto, meglio di forma circolare, con foro di scarico piccolo e liscio (meglio se accessibile dall'esterno, come le vaschette usate per i bagnetti dei bambini), e riempitela d'acqua.

A questo punto dovreste mettere la vasca a riposo nella stanza della casa più lontana da possibili correnti d'aria o vibrazioni, e attendere che l'acqua sia completamente ferma (questo può richiedere anche alcuni giorni).

Ora, stappando la vasca molto lentamente e con estrema cura, cioè facendo attenzione a non indurre moti vorticosi, dovreste riuscire a vedere veramente all'opera la forza di Coriolis che – ricordiamo – vi farà scoprire in maniera indiretta il fatto che noi viviamo su un sistema di riferimento in rotazione, e quindi non inerziale.

In pratica, avrete evidenziato la rotazione della Terra: un esperimento, quindi, che ha lo stesso valore del famoso *pendolo di Foucault*, concepito proprio per dimostrare la rotazione della Terra attraverso l'osservazione dell'effetto Coriolis.

Il primo pendolo di questo tipo venne presentato per la prima volta in pubblico nel 1851 da parte del fisico francese Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), da cui prese poi il nome, e consisteva in una pesante sfera metallica legata a un lungo filo appeso sotto la cupola del Pantheon di Parigi.

Un qualunque pendolo libero di oscillare in ogni direzione evidenzia, con il passare delle ore, una lenta rotazione del proprio piano di oscillazione, la cui velocità dipende dalla latitudine del luogo.

In particolare, ai poli il piano completa una rotazione esattamente in un giorno siderale (è il tempo che impiega la Terra a rotare su se stessa rispetto alle stelle: dura circa 23 ore e 56 minuti, circa 4 minuti meno di quanto dura un giorno solare, cioè il tempo di una rotazione completa che "riporta" il Sole nella stessa posizione).

A latitudini intermedie si misurano tempi di rotazione maggiori: a 45° di latitudine il giro si completa in 1,4 giorni; a 30° in 2 giorni; a 15° in 3,9 giorni e così via. Solo all'equatore il piano non ruota.

Questa rotazione, oraria nell'emisfero boreale e antioraria in quello

australe, si spiega proprio con l'azione della forza di Coriolis che agisce continuamente sulla massa del pendolo, curvandone la traiettoria durante l'oscillazione. Ma se potessimo osservare il fenomeno da un sistema di riferimento inerziale, scopriremmo che non è il piano di oscillazione a cambiare, come giustamente previsto dal principio di inerzia, ma è la Terra che gli ruota sotto.

L'esperimento del pendolo di Foucault è solo in apparenza semplice da realizzare.

In realtà invece è piuttosto complesso, perché piccole imprecisioni nella costruzione possono causare deviazioni nell'oscillazione in grado di mascherare l'effetto della rotazione terrestre. Tuttavia è molto interessante e istruttivo da vedere, per cui diversi musei ne espongono uno.

Naturalmente il pendolo ha la tendenza a fermarsi, frenato dalla resistenza dell'aria: per questo motivo, i pendoli moderni hanno un meccanismo che li tiene costantemente in movimento. Per evidenziare la rotazione della Terra, è sicuramente meglio tentare con l'acqua nella vasca.

Difficile, certo, ma meno impegnativo.

Come funziona un sifone

Bene, fin qui abbiamo parlato di lavandini, docce, vasche da bagno, vagando e divagando per caos, termometri, bolle di sapone, cicloni e pendoli di Foucault. Ma c'è un sanitario che non può davvero mancare in nessun bagno. Gabinetto, sciacquone, *water closet*, toilette: chiamatelo come volete, ma ogni casa deve averne almeno uno. Non possiamo quindi esimerci dal parlarne, anche perché, occorre riconoscerlo, il WC è un vero e proprio gioiello di ingegneria idraulica. Cerchiamo allora di astrarci, di allontanare il pensiero del gabinetto come luogo tabù, e andiamo invece a scoprire insieme il funzionamento di questa meraviglia della tecnologia.

Innanzi tutto guardiamo quali sono gli elementi che compongono un WC. I sistemi idraulici che devono lavorare insieme sono tre: la tazza con

il sifone, il meccanismo di scarico (lo sciacquone) e il meccanismo di riempimento dell'acqua. Questi ultimi due sono naturalmente nascosti nel serbatoio d'acqua (la cassetta), ma in molti casi possono essere studiati tirando su il coperchio del serbatoio, che è semplicemente appoggiato alla cassetta, proprio per rendere agevoli eventuali operazioni di manutenzione dell'impianto.

Così troviamo la valvola di riempimento, il galleggiante, il tubo di sicurezza (detto anche *troppopieno*) e la valvola di scarico.

Tutti questi elementi possono essere disposti in maniera varia ed eventuale, ma sono sempre presenti all'interno del serbatoio. A mettere in funzione l'insieme di scarico-carico è naturalmente una leva che, di volta in volta, può essere attivata da una catenella, da un pulsante, da una maniglia e così via.

Analizziamo la tazza di maiolica, avente sul retro l'elemento fondamentale dell'impianto idraulico del WC: il sifone. Supponete che il serbatoio sia guasto e non possiate usarlo per scaricare acqua nel WC. Nessun problema, perché la tazza e il sifone, pur non avendo alcuna parte mobile o né essendo chissà quale strano marchingegno tecnologico, sono comunque più che sufficienti e possono svolgere egregiamente il loro lavoro anche in assenza dei due sistemi di scarico e di riempimento.

Scopriamo come.

In generale, un sifone è un condotto curvo, a forma di U rovesciata, impiegato per portare un liquido da un serbatoio posto a un certo livello (la tazza del WC) a un altro serbatoio posto a un livello inferiore (lo scarico fognario). Nel percorso, il liquido, proprio a causa della forma a U rovesciata, è quindi costretto a toccare per alcuni tratti anche quote superiori ai livelli di entrambi i serbatoi. Negli impianti igienici, il sifone, grazie a questa forma, permette la chiusura idraulica delle tubazioni di scarico, impedendo che gas maleodorante possa eventualmente risalire dalla colonna di scarico e giungere, attraverso il WC, nella nostra abitazione.

Questo avviene intrappolando un po' di acqua pulita in fondo alla tazza,

la quale comunica appunto con il sifone. Per il principio dei vasi comunicanti, poiché da entrambi i lati si ha la pressione atmosferica, il livello dell'acqua nella tazza è uguale a quello dell'acqua contenuta nel ramo della U vicino al WC, che naturalmente non può essere superiore alla sommità della U rovesciata del sifone.

Ecco perché, nei casi in cui il WC non viene usato a lungo, capita di sentire cattivi odori provenienti dal sifone: l'acqua che contiene evapora progressivamente e talvolta può capitare che la chiusura idraulica venga a mancare. Ma è sufficiente scaricare nuova acqua per ripristinare la condizione a regime del sifone e farlo tornare a funzionare regolarmente.

È possibile capire come funziona un sifone facendo due semplici esperimenti. Dapprima prendiamo un bicchiere pieno d'acqua, e versiamolo nella tazza.

Scopriremo che, in prima approssimazione, non accade niente, ovvero il livello dell'acqua rimane costante perché quella che abbiamo versato è andata a sostituire quella che invece è caduta giù per il tubo di scarico perché aveva superato la quota massima ammessa dalla U rovesciata del sifone. Questo accade anche se versiamo 20-30 bicchieri d'acqua uno dietro l'altro.

Completamente diverso, invece, è il comportamento del sifone quando l'acqua dei trenta bicchieri viene raccolta in un secchio e versata tutta insieme nella tazza.

A quel punto, infatti, la tazza scarica tutta l'acqua che viene letteralmente risucchiata verso il sifone e da lì verso le tubature fognarie. Il classico rumore dello sciacquone e il successivo gorgoglio dell'aria dicono che il sifone prima si è svuotato e poi si è nuovamente riempito d'acqua.

Avendo gettato molta acqua nella tazza in pochi secondi, infatti, il sifone si è potuto riempire completamente. Ma una volta riempito, la differenza di pressione idrostatica fra i livelli dei due serbatoi – la tazza e lo scarico fognario – fa sì che l'acqua del WC venga totalmente risucchiata: è l'*effetto sifone*.

Subito dopo, l'arrivo dell'aria nel sifone e il suo riempimento con nuova

acqua determinano la fine del processo… in attesa di un altro scarico.

L'esperimento del secchio – che probabilmente avrete già provato, magari quando non avevate acqua corrente e ne avevate messa un po' da parte per le emergenze – dimostra che la tazza e il sifone possono tranquillamente bastare nello svolgimento delle funzioni essenziali per cui sono stati progettati.

Ma è anche interessante capire come si comportano il meccanismo di scarico e quello di riempimento, che, come detto, in genere costituiscono un tutt'uno con la tazza e il sifone.

Lo scopo del serbatoio è esattamente quello del secchio nell'esempio appena fatto. Perché l'effetto sifone si attivi, infatti, è necessario che una certa quantità di acqua venga versata molto velocemente nella tazza. Sciacquoni tipici rilasciano una decina di litri d'acqua in pochi secondi. Per riempire nuovamente il serbatoio servono invece diverse decine di secondi, se non minuti.

A mettere in moto il meccanismo di scarico siamo naturalmente noi, nel momento in cui premiamo il pulsante. Alzando il coperchio del serbatoio, si scopre che il pulsante è collegato con la valvola di scarico, la quale si solleva, spostandosi dalla sua sede e lasciando aperto un foro di alcuni centimetri di diametro.

È appunto da qui che l'acqua si riversa nella tazza, la quale può essere stata modellata con un unico grande foro d'ingresso o con tanti fori più piccoli lungo il bordo. In ogni caso, la maggior parte dell'acqua scaricata viene giù direttamente dal foro principale: solo così, infatti, è possibile attivare il sifone e ottenere l'effetto di risucchio desiderato.

Lo schema del meccanismo di scarico è molto semplice. Assai più ingegnoso è invece il meccanismo di riempimento del serbatoio. Una volta che questo è completamente svuotato, la valvola di scarico torna al proprio posto sul fondo del serbatoio stesso, andando a coprire il foro da cui è passata l'acqua e permettendo al serbatoio di riempirsi nuovamente.

È a questo punto che entra in funzione il meccanismo di riempimento. Una valvola decide se far entrare nuova acqua nel serbatoio oppure no.

Questa valvola si apre quando il galleggiante cade.

Ma questo accade proprio quando il livello dell'acqua nel serbatoio si abbassa. Così, mentre l'acqua si riversa nella tazza, il serbatoio inizia nuovamente a riempirsi (la valvola di scarico a questo punto sarà chiusa), sollevando il galleggiante.

Al termine del processo, il galleggiante sarà arrivato a un livello tale da chiudere la valvola di riempimento e impedire che questa versi ancora acqua nel serbatoio.

Come elemento di sicurezza dell'impianto – nel caso in cui il galleggiante si incastri sul fondo o la valvola di riempimento si blocchi nella posizione di apertura – c'è comunque il tubo del troppopieno, ovvero l'apertura di scarico accessoria che, versando nella tazza, impedisce in ogni caso all'acqua in eccesso di superare il livello di sicurezza del serbatoio e di riversarsi sul pavimento del bagno.

A questo punto abbiamo analizzato tutti i componenti del gabinetto. Può quindi essere utile, per concludere questo capitolo, riassumere brevemente per punti l'intero meccanismo di funzionamento di questo sanitario fondamentale.

Premendo il pulsante, apriamo la valvola di scarico.

Una decina di litri d'acqua si versa nella tazza in pochi secondi. Subito dopo la valvola di scarico si richiude.

Si attiva il sifone, il quale risucchia tutto il contenuto della tazza nella conduttura di scarico e da lì verso l'impianto fognario. Nella tazza arriva solo un po' di nuova acqua che va nuovamente a svolgere la funzione di chiusura idraulica delle tubature.

Nel frattempo, seguendo l'abbassamento dell'acqua nel serbatoio, si abbassa anche il galleggiante, causando l'apertura della valvola di riempimento.

Via via che aumenta il livello dell'acqua, risale anche il galleggiante, che finalmente arriva a chiudere la valvola di riempimento.

Il processo a questo punto è concluso, ma se qualcosa dovesse andare storto, il troppopieno previene un eventuale allagamento.

Veramente ingegnoso, non vi pare?

III
La fisica in camera da letto

Di materassi a molle, orologi, calendari e borse dell’acqua calda

Il tempo è ciò che accade quando non accade nient’altro.
RICHARD FEYNMAN

Dopo cucina e bagno, la camera da letto è sicuramente uno degli ambienti essenziali di ogni casa.

Che si viva in una villa di cento stanze o in un monolocale di pochi metri quadrati, difficilmente si può fare a meno di un letto e degli accessori che generalmente lo corredano: cuscini, lenzuola, coperte. Ma la comodità del letto non è sufficiente a farci dormire bene.

È anche importante non avere freddo: ecco perché, nel corso dei secoli, l’umanità si è sbizzarrita nell’inventare scaldini, termocoperte e borse dell’acqua calda.

E su ogni comodino che si rispetti, oltre agli occhiali, al libro che stiamo leggendo, alla fotografia dei nostri cari, non manca la sveglia, il fatidico strumento di tortura a cui ogni mattina deleghiamo l’ingrato compito di riportarci, volenti o nolenti, dal mondo dei sogni al mondo reale.

Di che cosa parleremo, quindi, muovendoci in camera da letto? Di elasticità, di trasporto del calore e, soprattutto, del tempo. Non di quello meteorologico, però, ma di quello che scorre inesorabile, alla velocità di un secondo al secondo, accompagnando con la sua presenza, talvolta eterea, spesso incombente, ogni istante della nostra vita.

BIDIBODIBÙ, BIDIBODIYÈ… OVVERO: PROVE TECNICHE DI ELASTICITÀ

Molti lettori ricorderanno lo spot pubblicitario – andato in onda la prima volta oltre quarant'anni fa – il cui motivo musicale dà il titolo a questa sezione. Marito e moglie vanno a cena fuori, lasciando i bambini a casa, con la speranza di trovarli addormentati al loro rientro. Rincasando, il silenzio che regna in casa fa immaginare alla coppia che i loro figli siano a letto, ma la speranza si dimostra molto presto vana: aperta la porta della camera dei bambini, trovano questi in pigiama che cantano il famoso "jingle", saltando allegramente sui materassi che non fanno rumore perché l'azienda pubblicizzata produce materassi a molle che non cigolano!

In effetti, i salti dei bambini sono una delle prove di elasticità più dure che un materasso debba sopportare. In questa parte vogliamo proprio approfondire l'argomento elasticità, partendo però dall'analisi dei materiali con cui vengono realizzati gli elementi più importanti dei nostri letti.

Al di là di come ciascuno di noi lo preferisce – duro e inflessibile come una tavola di marmo oppure morbido e accogliente come un mare di gommapiuma – dalla comodità del letto dipende il nostro riposo. E i due elementi costitutivi che ne definiscono tale caratteristica sono naturalmente la rete e il materasso. Due oggetti che devono possedere una proprietà fondamentale della materia allo stato solido, ovvero un certo grado di elasticità.

Vediamo meglio come funzionano. La rete, che deve sopportare il nostro peso e quello del materasso, in genere è costituita da una struttura metallica sostenuta da un'intelaiatura, anch'essa generalmente in metallo, oppure da una serie di assicelle in legno (le cosiddette "doghe"), incurvate in modo che la convessità sia rivolta verso l'alto, anch'essa sostenuta da un telaio.

Per svolgere correttamente la loro funzione di ammortizzatori, le doghe devono essere parallele fra loro e poste trasversalmente rispetto al lato lungo del letto (in pratica, devono essere perpendicolari alla direzione testa-piedi individuata dal nostro corpo steso sul letto).

Nonostante le tecnologie di produzione dei materassi tendano sempre di più a ridurre l'importanza della rete come elemento chiave per una corretta

postura del corpo durante il sonno, è sempre opportuno verificare che questa sia comunque in grado di reggere senza problemi il peso di tutto quello che sta sopra, senza inarcarsi troppo. Ovviamente tutto dipende dal grado di tensione dell'intreccio di fili e ganci metallici che costituiscono la rete, o dallo stato di salute del legno di cui sono composte le doghe.

Se infatti la rete sprofonda sotto il nostro peso, il materasso non può far altro che seguirla, inarcandosi di conseguenza.

A differenza della rete, l'elasticità del materasso può essere affidata a diverse tipologie di materiali: a parte le fodere e i tessuti interni, un materasso può essere infatti costituito da molle metalliche – l'acciaio è il materiale più impiegato allo scopo –, o avere un'imbottitura costituita da materiali elastici naturali o sintetici, come il lattice di gomma, la gommapiuma (marchio registrato) o il poliuretano espanso. In particolare, riferendoci a questi ultimi casi, quando si parla di materasso in lattice o in gommapiuma, tecnicamente si intende che questi sono impiegati sotto forma di schiume, ovvero di miscele con aria in cui questa può arrivare a occupare anche il 90 per cento del volume del materasso. Anche il poliuretano si presenta sotto forma di schiuma.

Prima di approfondire, grazie alle molle metalliche, l'argomento elasticità che è un capitolo importante della meccanica classica, approfittiamo del fatto che stiamo parlando di lattice e di altri derivati della gomma, per accennare al fatto che questi, prima di arrivare a noi, ovvero all'utente finale, vengono sempre sottoposti alla *vulcanizzazione*, il processo di lavorazione che permette alla gomma di legarsi chimicamente allo zolfo tramite riscaldamento.

è grazie alla vulcanizzazione, ideata dall'inventore statunitense Charles Goodyear (1800-1860) nel 1839 e brevettata nel 1844 che la gomma può raggiungere una certa durezza, la resistenza alla trazione e il grado di elasticità desiderato.

Oltre a questo, la vulcanizzazione elimina alcune proprietà negative della gomma, quali l'appiccicosità, l'abrasività e la scarsa resistenza agli agenti chimici e atmosferici. Solo così, la gomma naturale – nota anche con il

nome di caucciù, ottenuta coagulando il lattice estratto soprattutto dalla pianta tropicale *Hevea brasiliensis* tramite incisione del tronco – diventa stabile e può assolvere in maniera duratura e adeguata ai compiti a lei assegnati, come quelli, per esempio, di viaggiare sotto forma di pneumatico per auto per decine di migliaia di kilometri, su qualunque tipo di terreno e in qualunque condizione climatica.

Il lattice di gomma, oltre a essere il materiale naturale più elastico che si conosca, ha anche un'altra proprietà fisica fondamentale: la *resilienza*, ovvero la capacità di tornare in breve tempo ad assumere la sua forma originale dopo essere stato sottoposto a compressione o trazione (allungamento). Altra caratteristica che rende tale materiale ideale per la fabbricazione di materassi.

Molle e non solo

Ed eccoci alle molle, gli oggetti elastici per eccellenza. Esistono tantissimi tipi di molle, ma certamente le più note sono quelle costituite da un filo metallico – generalmente acciaio – avvolto a spirale cilindrica (ma spesso anche conica e biconica, come avviene, per esempio, proprio nei materassi a molle).

Scopo della molla è, in generale, accumulare energia meccanica, da restituire al momento opportuno proprio grazie alle sue proprietà elastiche. Questo, nelle molle a spirale, si ottiene sottoponendo a compressione o a trazione le spire di metallo, le quali, una volta eliminata tale forza di compressione o di trazione, torneranno alla loro condizione di riposo, eventualmente dopo aver oscillato un po', ovvero allungandosi o accorciandosi periodicamente attorno al valore di lunghezza corrispondente al riposo della molla.

Questo comportamento è strettamente legato alla struttura fisica della materia. Dei tre stati fisici della materia, infatti, quello solido è l'unico ad avere una forma propria. Gli elementi allo stato aeriforme (comunemente detto "gassoso", anche se impropriamente) e allo stato liquido, invece, prendono la forma del contenitore in cui si trovano. In altre parole, ogni

corpo solido possiede una propria configurazione geometrica a riposo dotata di una certa resistenza, ovvero capace di sopportare, entro determinati limiti, tensioni e deformazioni causate da azioni esterne, come, per esempio, l'applicazione di forze perpendicolari (sforzi di compressione o di trazione) o parallele (sforzi di taglio) alla superficie del corpo.

Responsabili di questa resistenza sono naturalmente i legami atomici e molecolari dei materiali che compongono il corpo solido. I comportamenti macroscopici osservati sono infatti da considerare sempre il riflesso visibile di quanto avviene a livello microscopico.

Infatti, quando un corpo solido è messo sotto sforzo, all'interno del materiale di cui è composto si manifestano delle forze, dovute naturalmente ai legami atomici e molecolari in esso presenti.

In pratica, considerate due regioni interne del corpo, fra queste si eserciteranno reciprocamente delle forze di contatto, agenti attraverso le relative superfici di separazione. Tanto più intense sono queste forze, tanto più resistente è il materiale.

Il rapporto fra queste forze di contatto e la superficie attraverso cui si esercitano viene chiamato dai fisici *tensione* interna (o sforzo, o sollecitazione, o *stress*, dall'inglese). Il concetto di stress, o tensione, ha un ruolo molto importante nella scienza dei materiali, proprio perché da esso dipende la caratterizzazione dello stato delle forze interne del corpo e, in ultima analisi, il comportamento del materiale costituente il corpo, quando questo è sottoposto all'azione deformante di forze applicate dall'esterno. In pratica, infatti, la tensione interna è la risposta del materiale all'applicazione di un carico esterno, ovvero la reazione volta a bilanciarlo.

A ogni stress corrisponde sempre uno *strain*, termine inglese che sta a indicare la deformazione risultante, intesa qui come variazione relativa in lunghezza, superficie o volume del corpo sottoposto a sollecitazione.

Ora, non tutti i materiali sono elastici, ovvero hanno la capacità di tornare normalmente alla condizione iniziale di riposo una volta che sia stata rimossa la causa della deformazione.

Altri materiali, detti *viscoelastici*, mostrano pure proprietà elastiche, ma

con un effetto di smorzamento, dovute a un certo grado di viscosità. Questi materiali in genere non recuperano appieno la forma precedente all’azione deformante, perché, proprio a causa della viscosità, parte del lavoro compiuto per deformare il materiale si trasforma in calore che va a riscaldare il materiale stesso.

Oltre a questo, il parziale ripristino della deformazione richiede comunque tempi molto più lunghi di quelli tipici di un materiale puramente elastico. Un esempio di materiale viscoelastico è dato da alcuni tipi di legno.

Sempre in relazione alla risposta data a un carico deformante, è possibile definire un’ultima categoria di materiali: quelli plastici. I corpi solidi plastici sono quelli che, quando il carico supera un certo valore limite, cambiano in maniera permanente la loro forma a riposo in risposta a tale carico (deformazione plastica o anelastica).

La plastica prende il suo nome proprio dal fatto di essere un materiale avente questo comportamento tipico. Le eventuali deformazioni elastiche causate dal carico prima che questo arrivi al valore limite sono al solito recuperabili con l’eliminazione del carico stesso, mentre la deformazione plastica non può mai essere recuperata.

In questa classificazione abbiamo lasciato sottinteso il fatto che tanto i materiali viscoelastici quanto quelli plastici manifestano sempre in una certa misura comportamenti elastici.

Quasi tutti i materiali, infatti, se sono sottoposti a tensioni interne sufficientemente piccole (ovvero a carichi piccoli) o a deformazioni piccole rispetto alla forma originale, si comportano in maniera tale che la deformazione è direttamente proporzionale alla tensione stessa, ovvero alla forza interna per unità di superficie che si manifesta in risposta alla deformazione.

Il coefficiente di proporzionalità fra tensione e deformazione risultante prende il nome di *modulo di elasticità* o anche *modulo di Young*, dal nome del fisico e medico britannico Thomas Young (1773-1829), noto non solo per le sue ricerche sull’elasticità dei materiali, ma anche e soprattutto per i

suoi studi di ottica: fu infatti Young, con il suo famoso esperimento della doppia fenditura, a dimostrare in maniera incontrovertibile la natura ondulatoria della luce.

Il modulo di elasticità definisce pertanto l'elasticità del materiale e anche quanta energia meccanica elastica può immagazzinare. In generale, più è elevato il valore del modulo di elasticità, più il materiale è difficile da allungare, comprimere o piegare.

Per essere leggermente più rigorosi, occorre dire che in realtà non esiste un unico modulo di elasticità per ciascun materiale, ma ne esistono tre, esattamente tanti quanti sono i tipi di tensione possibile: allungamento (*trazione*), accorciamento (*compressione*) e scorrimento (*taglio*). I primi due corrispondono a carichi applicati perpendicolarmente alla superficie del corpo, mentre l'ultimo, come accennato in precedenza, fa riferimento a forze applicate tangenzialmente a tale superficie.

Mamma mia, che stress!

Quando, studiando il comportamento di un materiale, i fisici si trovano nella situazione in cui tensione e deformazione sono direttamente proporzionali, dicono che l'elasticità è nella regione lineare del *diagramma tensione-deformazione* (binomio forse più noto con l'equivalente espressione inglese *stress-strain*).

La costruzione del diagramma *stress-strain*, ovvero del grafico che mette appunto in relazione la deformazione di un materiale al variare della tensione interna, è uno dei compiti fondamentali della fisica applicata e della scienza dei materiali: per esempio, questo diagramma è largamente usato dagli ingegneri nello studio dei materiali impiegati nella costruzione di case, ponti, dighe, macchine e comunque ogni qual volta si trovano a impiegare materiali che devono operare sotto sforzo (cosa che accade quasi sempre!).

Quella che abbiamo espresso come proporzionalità diretta fra tensione (o carico applicato) e deformazione può essere considerata come la forma generalizzata individuata da Young di una legge di elasticità lineare più

vecchia, formulata dallo scienziato inglese Robert Hooke (1635-1703), da cui prende appunto il nome di *legge di Hooke*, e che riguarda proprio le molle.

La legge di Hooke esprime infatti la relazione esistente fra la forza applicata a una molla e la deformazione lineare che ne deriva: se la forza è di compressione, la molla infatti si accorcia, viceversa questa si allunga se la forza è di trazione. In particolare, nel caso di una forza di trazione, la legge di Hooke stabilisce una proporzionalità diretta fra la forza applicata e l'allungamento della molla, misurato naturalmente in relazione a una lunghezza a riposo della molla stessa, in cui non si manifestano tensioni.

Analogo ragionamento vale nel caso di una forza di compressione, dove, invece dell'allungamento, si misura di quanto la molla si è accorciata rispetto alla lunghezza a riposo. La costante di proporzionalità prende il nome di *costante elastica* e dipende naturalmente dal modulo di elasticità, specifico del materiale, e dalle caratteristiche costruttive della molla, quali lunghezza e sezione.

È immediato capire che la legge di Hooke ha validità limitata alla regione lineare del diagramma tensione-deformazione, ovvero entro il limite di deformazione elastica. Se la forza applicata supera questo limite, la molla non torna più alla lunghezza iniziale e la deformazione diventa plastica, cioè permanente.

A livello microscopico quello che accade è naturalmente la rottura e il conseguente riarrangiamento dei legami atomici e molecolari all'interno del materiale. La tensione a cui il materiale cessa di rispondere in maniera elastica alle sollecitazioni e inizia a manifestare deformazioni plastiche è nota tecnicamente come *tensione di snervamento*. Al di sopra di questo punto, anche al cessare dell'azione della forza esterna applicata, la deformazione della molla è irreversibile.

La pressione massima che un materiale è in grado di sostenere senza rompersi è invece chiamata *modulo di rottura* o *carico di rottura*. Acciaio e ferro hanno valori dei moduli di elasticità molto elevati e praticamente identici. L'alluminio ha un modulo di elasticità inferiore alla metà di quelli

di acciaio e ferro, ma nettamente superiore a quelli di polietilene e gomma, aventi moduli di Young rispettivamente pari a un centesimo e a un decimillesimo di quello dell'alluminio.

È facile intuire che un materiale è tanto più elastico quanto più basso è il valore del suo modulo di Young. Ai diversi tipi di gomme, più o meno dure, sono anche associati moduli di Young diversi. Fra il tipo di gomma più dura e quello di gomma più morbida ed elastica il modulo di Young cambia addirittura di un fattore 10.

Viceversa, moduli di elasticità molto alti come quelli dell'acciaio sono indici di un elevato grado di rigidità. Ecco perché i materassi a molle sono molto diversi da quelli in lattice di gomma.

La molla riveste in fisica classica un ruolo molto importante. Lo studio del suo moto quando essa è spostata dalla sua posizione di equilibrio è infatti alla base degli studi di tutti i moti oscillatori e periodici. La molla ideale – perfettamente elastica, indeformabile (condizioni che si verificano nelle molle reali solo nel caso di deformazioni di piccola entità), non soggetta ad attriti o ad altre cause di smorzamento – è il prototipo di quello che i fisici chiamano *oscillatore armonico*.

L'oscillatore armonico è un sistema meccanico che, spostato dalla sua condizione di equilibrio, è soggetto a una forza di richiamo proporzionale all'entità della deformazione, ovvero a una forza elastica la cui espressione è ricavabile dalla legge di Hooke. Lasciato libero di muoversi, l'oscillatore armonico si muove di *moto armonico semplice*, costituito da oscillazioni sinusoidali attorno alla posizione di equilibrio di ampiezza e frequenza costanti.

Un esempio classico di oscillatore armonico semplice è quello dato da una molla orizzontale, appoggiata su un piano, a cui è agganciato un corpo avente una certa massa. Trascurando la massa della molla (è sufficiente che questa sia molto piccola rispetto alla massa agganciata) e gli attriti con il piano di appoggio, la frequenza del moto dipende solo dai valori della costante elastica della molla e della massa agganciata.

In particolare, maggiore è la costante elastica, maggiore è la frequenza.

Viceversa, la frequenza diminuisce all'aumentare della massa.

Un altro esempio di oscillatore armonico molto sfruttato nei libri di fisica classica è quello dato da una molla verticale a cui è appeso un corpo avente una certa massa. A differenza del caso precedente, la molla qui è costantemente sottoposta alla forza-peso dovuta all'attrazione gravitazionale che la Terra esercita su tale massa. La sua posizione di equilibrio sarà quindi diversa, ovvero leggermente allungata, da quella che avrebbe in assenza di tale forza.

In queste condizioni, trascurando attriti dei vincoli e resistenza dell'aria, la molla oscillerà periodicamente attorno a questa nuova posizione di equilibrio.

Sia in questo caso sia nel precedente, al momento in cui si voglia tenere in considerazione gli attriti, ovvero si voglia studiare il comportamento reale del sistema, avremo non più un moto periodico semplice, ma un moto periodico smorzato, in cui la frequenza di oscillazione sarà minore del caso non smorzato e l'ampiezza dell'oscillazione diminuirà via via nel tempo fino a esaurirsi. Al termine del processo, la massa si troverà ferma nella posizione di equilibrio definita dal fatto che alla molla siano o meno applicate forze.

Il pendolo semplice

Un caso particolarmente importante di moto armonico è quello del pendolo semplice, ovvero di una massa appesa all'estremità di un filo teso, vincolato a un punto fisso all'altra estremità.

Nel caso ideale di filo inestensibile e di massa trascurabile, le uniche forze agenti sulla massa sono la tensione del filo e la forza di gravità. Spostando leggermente la massa dalla sua posizione di equilibrio (quella verticale, ovvero del filo a piombo, naturalmente), il pendolo inizia a oscillare proprio sotto l'azione dell'attrazione gravitazionale esercitata dalla Terra sulla massa appesa al filo.

Quando l'ampiezza dello spostamento iniziale dall'equilibrio è piccola, le oscillazioni osservate sono piccole e l'equazione del moto del pendolo è

riconducibile a quella di un oscillatore armonico semplice (ma solo nel caso delle piccole oscillazioni, appunto).

Il moto armonico del pendolo, quindi, ha un'ampiezza costante – pari all'angolo fra la posizione iniziale e la posizione di equilibrio – e un periodo costante che dipende dall'accelerazione di gravità e, in particolare, dalla lunghezza del pendolo.

Questo dato è molto importante: poiché infatti il periodo aumenta con la radice quadrata della lunghezza del pendolo, pendoli corti avranno periodi molto più brevi di pendoli lunghi, i cui periodi sono quindi più facilmente misurabili. Ecco perché i grandi sperimentatori – come Galileo o Foucault – erano soliti appendere i loro pendoli sotto cupole molto alte. Con anche il risultato di avere spostamenti lineari molto più ampi di quelli che si hanno usando pendoli corti.

Il fatto che il periodo del pendolo dipenda anche dall'accelerazione di gravità – in ragione dell'inverso della radice quadrata di tale grandezza – implica che lo stesso pendolo oscilla con periodi diversi in condizioni di gravità diversa.

Considerazione non oziosa, questa, se si pensa che l'accelerazione di gravità cambia al variare dell'altitudine del luogo in cui ci si trova. A livello del mare essa vale 9,81 m al secondo quadrato, mentre in vetta all'Everest (circa 8850 m) il suo valore è pari a 9,78 m al secondo quadrato: questo è il motivo per cui gli scienziati, in mancanza di altre informazioni, impiegano sempre il valore dell'accelerazione di gravità al livello del mare. È un modo per ottenere risultati confrontabili con quelli ottenuti da altri.

Così, se un pendolo al livello del mare ha un periodo di oscillazione di 10 s, a 3000 m di altitudine avrà un periodo superiore di circa 5 millesimi di secondo: un ritardo solo apparentemente trascurabile, perché dopo poco più di un quarto d'ora il ritardo accumulato sarà già di 1 s che, a fine giornata, diventa 1 min e mezzo. E tutto questo senza considerare che anche la lunghezza del pendolo può variare, in particolare al variare della temperatura.

Tutti i materiali, infatti, sono soggetti a dilatazione termica, ovvero al processo di allungamento causato dall'aumento di temperatura. Ecco perché i costruttori di pendoli si sono nel tempo affannati alla ricerca di materiali a basso coefficiente di dilatazione termica per approdare infine, nella prima metà del Settecento, all'impiego di sistemi di compensazione della dilatazione basati sugli effetti di controbilanciamento di leghe metalliche diverse.

Fu grazie agli studi del nostro Galileo Galilei (1564-1642) che venne scoperta la proprietà fondamentale del pendolo: l'*isocronismo*. Come accennato poco sopra, nel caso delle piccole oscillazioni, il periodo di oscillazione del pendolo dipende solo dalla sua lunghezza. È quindi indipendente dall'ampiezza delle oscillazioni stesse. Questo significa che un pendolo, a parità di tutte le altre condizioni (temperatura, altitudine ecc.), oscilla sempre con lo stesso periodo, qualunque sia l'ampiezza delle oscillazioni che è costretto a fare.

Questo fatto, apparentemente controintuitivo, può comunque essere facilmente sperimentato con un'altalena. A patto – lo ribadiamo – che l'ampiezza dell'angolo rispetto alla posizione verticale di equilibrio non sia grandissima (diciamo non superiore a 30°), l'altalena oscilla con lo stesso periodo sia che l'ampiezza sia di 10° sia che sia di 20°, tanto per fare un esempio. E questo accade sia con un bambino sopra sia senza: il periodo infatti non dipende in alcun caso dalla massa del pendolo.

Secondo la testimonianza di Vincenzo Viviani (1622-1703), giovane allievo di Galileo ad Arcetri negli ultimi anni di vita dello scienziato e suo primo biografo, Galileo si dedicò allo studio del moto del pendolo attorno al 1581.

A stimolarlo in questa sua ricerca fu l'osservazione delle oscillazioni di un lampadario a candele sospeso nella cattedrale di Pisa, sua città natale, oltre che luogo in cui compì i suoi studi universitari. Galileo riteneva che il fenomeno dell'isocronismo del pendolo, ovvero che il suo periodo di oscillazione fosse indipendente dall'ampiezza delle oscillazioni, valesse per qualunque ampiezza dell'oscillazione, mentre in realtà il pendolo è

strettamente isocrono solo nel caso in cui le sue oscillazioni siano di piccola ampiezza (ecco il motivo per cui abbiamo insistito molto sulle piccole oscillazioni!).

A scoprire che l'isocronismo del pendolo era una proprietà dipendente dalla ridotta ampiezza delle oscillazioni fu un altro grande scienziato del Seicento, l'olandese Christiaan Huygens (1629-1695), il quale giunse a questa conclusione solo pochi decenni dopo gli studi di Galileo.

In ogni caso, già ai tempi di Galileo si poté iniziare a usare il pendolo come strumento per misurare gli intervalli di tempo. Fra le prime applicazioni vi fu, per esempio, quella realizzata in campo medico, dell'impiego del pendolo come misuratore della frequenza cardiaca.

Già Galileo, ormai vecchio, provò ad abbozzare un progetto di orologio a pendolo, ma la soluzione venne trovata solo attorno al 1660 da Huygens che, appunto, è considerato l'inventore di questo strumento, per il quale ottenne un brevetto nel 1657 (anche se pare che il suo contemporaneo Robert Hooke fosse pure riuscito nell'intento; Huygens fu comunque il primo a produrre un pendolo perfettamente funzionante).

Naturalmente i pendoli reali, come le molle reali, hanno la tendenza a smorzare il loro moto e infine a fermarsi sotto l'azione delle forze di attrito dovute ai vincoli e alla resistenza dell'aria. È interessante osservare come uno dei modi in cui gli orologiai hanno risolto il problema è proprio trattandolo… con le molle!

In altre parole, il moto del pendolo, ma anche del bilanciere dell'orologio da polso, è garantito proprio dall'energia elastica accumulata da una molla, generalmente a spirale, avvolta su se stessa. La ricarica del pendolo o dell'orologio meccanico serve a questo: ad accumulare energia potenziale elastica nella molla, avvolgendola nuovamente su se stessa.

La conservazione dell'energia

È molto interessante studiare il moto degli oscillatori armonici anche dal punto di vista energetico. Con l'analisi di questi sistemi, infatti, è molto semplice comprendere il significato di un concetto fondamentale della

fisica qual è quello della conservazione dell'energia meccanica.

Proviamo a scoprire di che cosa si tratta.

Torniamo a considerare l'ultimo esempio che abbiamo fatto di un oscillatore armonico, quello del pendolo semplice. Perché inizi a oscillare, occorre spostarlo dalla sua posizione di equilibrio e poi lasciarlo andare. Il pendolo parte da fermo con la massa a una certa quota, accelera sotto l'azione della forza di gravità, raggiunge la sua velocità massima quando passa dalla posizione di equilibrio (dove la massa è nel punto più basso dell'arco di circonferenza che ne costituisce la traiettoria), per l'azione della gravità decelera sempre più, via via che la massa aumenta la propria quota, fino a fermarsi in posizione simmetrica a quella di partenza rispetto alla verticale passante per il punto di equilibrio e per il vincolo in alto. Per concludere un intero periodo di oscillazione, la massa deve tornare al punto di partenza percorrendo a ritroso le varie situazioni appena descritte.

Se il vincolo è ideale (ovvero senza attriti) trascuriamo la resistenza dell'aria e non vi sono altre cause di dissipazione dell'energia; l'energia totale del sistema si conserva, ovvero, come dicono i fisici, è una costante del moto.

In altre parole, se il sistema è isolato, ovvero non ha nessuno scambio energetico con l'ambiente esterno, in qualunque istante si vada a misurare questa energia, troveremo sempre lo stesso valore che è definito all'istante iniziale del moto dalla quota a cui portiamo la massa del pendolo.

Questa massa, infatti, per il solo fatto di essere a una certa altezza dal suolo, ha un'*energia potenziale gravitazionale*, ovvero un'energia dipendente esclusivamente dalla posizione, acquistata a spese del campo gravitazionale (siamo stati infatti noi, con la nostra forza, a compiere lavoro contro il campo gravitazionale stesso per sollevare la massa dalla quota minima fino a una certa altezza).

Via via che la massa scende di quota in virtù dell'oscillazione del pendolo perde una parte della propria energia potenziale che si trasforma in energia cinetica (la sua velocità aumenta, partendo da velocità nulla): essa dipende dalla velocità a cui si muove la massa stessa, ed è sempre

data dalla metà del prodotto della massa del corpo per il quadrato della sua velocità.

Al passaggio dal punto di equilibrio, tutta l'energia potenziale iniziale è completamente trasformata in energia cinetica: la velocità lineare della massa appesa al pendolo è massima, mentre la quota è la minima raggiungibile.

Passato il punto di minima altezza, la massa comincia a riguadagnare energia potenziale gravitazionale, perdendo però energia cinetica (la sua velocità diminuisce).

Quando, dopo mezzo periodo di oscillazione, la velocità si annulla nuovamente, la massa è di nuovo alla quota massima raggiungibile: la sua energia cinetica si è pertanto ritrasformata in energia potenziale gravitazionale.

In ogni periodo di oscillazione si verificano quindi due massimi di energia potenziale gravitazionale (corrispondenti all'annullamento dell'energia cinetica) alle due estremità dell'oscillazione, e due massimi di energia cinetica, corrispondenti ai due passaggi – uno all'andata, l'altro al ritorno – della massa dalla posizione di equilibrio.

Poiché l'energia meccanica del sistema è data in ogni istante del moto proprio dalla somma dei valori che l'energia potenziale gravitazionale e l'energia cinetica assumono in quel determinato istante, se indichiamo con U e T rispettivamente l'energia potenziale e quella cinetica misurate in un qualunque momento dell'oscillazione, possiamo sempre scrivere:

$$U + T = \text{costante.}$$

Ma quanto vale questa costante? Per scoprirlo è sufficiente determinare il suo valore nell'istante iniziale del moto, quando la velocità della massa è nulla (e quindi l'energia cinetica è zero) mentre l'energia potenziale gravitazionale ha il valore U_0 dato dal prodotto della massa m per l'accelerazione di gravità g per l'altezza dal suolo h_0, ovvero, in formula:

$$U_0 = m \cdot g \cdot h_0$$

A questo punto è quindi possibile scrivere:

$$U + T = U_0 + T_0$$

Ma poiché T_0 è uguale a 0 (sarebbe diverso da 0 se facessimo iniziare l'oscillazione con una velocità iniziale diversa da zero, ma il ragionamento non cambierebbe), avremo:

$$U + T = U_0$$

come avevamo anticipato all'inizio del nostro ragionamento.

Una descrizione del tutto analoga può essere fatta anche per gli altri esempi di oscillatore armonico a molla citati in precedenza. Nel caso della molla orizzontale, per esempio, si può sempre assegnare alla massa agganciata alla molla un'energia potenziale elastica, definita in questo caso dall'entità dell'allungamento o della compressione a cui è sottoposta la molla rispetto alla posizione di equilibrio.

Anche in questo caso, quindi, l'energia potenziale dipende solo dalla posizione della massa rispetto a una determinata posizione che, per comodità, può essere quella iniziale, ma che può essere scelta a piacere.

L'energia potenziale elastica di una molla è data dalla metà del prodotto della sua costante elastica per il quadrato dello spostamento della molla rispetto alla posizione di equilibrio. La molla accumula questa energia potenziale in virtù dello stiramento o dell'accorciamento dei legami atomici e molecolari, per restituirla periodicamente durante il moto sotto forma di energia cinetica.

I campi di forze, come quella elastica o quella gravitazionale, per i quali è possibile definire un'energia potenziale, dipendente dalla posizione assunta dal corpo sotto l'azione delle forze del campo, vengono detti *campi conservativi*, proprio perché in questi campi si osserva la conservazione dell'energia meccanica. A patto che, naturalmente, il sistema preso in considerazione sia isolato, ovvero non interagisca in alcun modo con l'ambiente.

Nel caso di molle e pendoli reali dobbiamo tenere in considerazione

anche gli attriti. Le forze di attrito fanno sì che parte dell'energia meccanica (se non tutta) venga dissipata, in genere sotto forma di calore.

Come si è visto nel primo capitolo parlando del primo principio della termodinamica, l'energia totale del sistema si conserva sempre solo che, a questo punto, occorre considerare non solo l'energia meccanica, ma anche quella interna del reticolo cristallino che costituisce la molla (che con l'oscillazione si riscalda, aumentando la propria energia interna) e quella dell'aria (che pure si riscalda opponendo resistenza al moto della molla o del pendolo).

Questo è il motivo per cui la molla e il pendolo non tornano mai in modo naturale alla loro posizione di partenza, ma smorzano via via le oscillazioni. L'energia meccanica si trasforma con il tempo in energia termica, e occorre fare nuovamente lavoro sul sistema perché questo inizi nuovamente a oscillare.

Per concludere questa sezione dedicata all'elasticità (e non solo), torniamo al punto da cui siamo partiti, ovvero dal *bidibodibù* della pubblicità.

Perché è un dato così importante da essere pubblicizzato il fatto che le molle non facciano rumore? Al di là del fastidio che può dare un letto che cigola, anche in questa considerazione entra in gioco l'energia. Se la molla fa rumore, infatti, significa che parte dell'energia meccanica viene spesa per produrre il suono (non può venire fuori dal nulla!), con conseguente smorzamento dell'ampiezza delle oscillazioni. Le molle silenziose, quindi, sono più elastiche di quelle cigolanti, perché, disperdendo meno energia, possono così mantenere più a lungo l'ampiezza originale di oscillazione. Un motivo in più, dunque, per scegliere molle non rumorose!

Finalmente a letto… ma che freddo!

Fuori fa freddo, sta nevicando, e, rientrati infreddoliti a casa, non aspettiamo altro che il momento in cui finalmente potremo andare a letto sotto le calde coperte. Ma entrati nel letto, una sensazione di freddo, quasi

di gelo, ci attanaglia, anche se siamo completamente rannicchiati sotto una spessa e pesante coltre di tessuto.

Il motivo, naturalmente, è che le coperte in sé non sono calde, ovvero più calde dell'ambiente circostante, ma si troveranno appunto a temperatura ambiente che, in generale e per fortuna, è di diversi gradi più bassa della nostra temperatura corporea. Così, a meno che non si abbia un vecchio scaldino o una moderna termocoperta, l'unico modo per riscaldare il letto… è quello di entrarci dentro e aspettare un po'. A contatto con il nostro corpo, assai più caldo, lenzuola e coperte assorbono calore – ricordate sempre che questo fluisce naturalmente dai corpi caldi ai corpi freddi, fino a che non viene raggiunto l'equilibrio termico, ovvero fino a quando i due corpi non si trovano alla stessa temperatura – e aumentano la loro energia interna, con il risultato che, dopo un certo tempo, sotto le coperte avremo una temperatura molto vicina a quella corporea, dandoci finalmente la sensazione di tepore che stavamo aspettando da tutto il giorno.

Il nostro corpo si mantiene infatti a temperatura costante, attorno ai 36 °C, grazie al metabolismo interno. In altre parole, pur cedendo continuamente calore all'esterno, mantiene sostanzialmente inalterata la propria energia interna, funzionando proprio come una sorgente di calore, la cui fonte primaria di energia è nei legami chimici di zuccheri, grassi e proteine che assimiliamo con il cibo.

Come ben sappiamo, però, non tutti i materiali sono in grado di trattenere così bene il calore come fanno le coperte di lana o i piumoni. Il fatto che il letto si mantenga più o meno caldo dipende infatti da due importanti proprietà fisiche dei materiali: la *capacità termica* e la *conducibilità termica*.

La prima è la proprietà di una materiale di assorbire o emanare calore, ovvero la sua capacità di accumulare (e rilasciare nel tempo) una certa quantità di energia termica. In particolare, maggiore è la capacità termica di un materiale, maggiore è l'energia termica che è in grado di accumulare.

La seconda, invece, è la proprietà specifica di un materiale di trasmettere

calore. In particolare, è una misura della quantità di calore che fluisce in un determinato intervallo di tempo attraverso un certo spessore del materiale quando ai due lati del materiale si hanno temperature diverse (ovvero si è in presenza di un gradiente di temperatura). Naturalmente, quanto più bassa è la conducibilità termica di un materiale, tanto migliori sono le sue proprietà isolanti.

La capacità termica di un corpo, ovvero la quantità di calore che esso è in grado di accumulare, dipende naturalmente da quanto è grande la sua massa. In pratica la capacità termica è una grandezza *estensiva*.

Per caratterizzare i materiali, però, i fisici hanno bisogno di proprietà *intensive*, indipendenti dalla quantità di materiale presa in considerazione. Ecco perché definiscono il calore specifico come la capacità termica per unità di massa.

In altre parole, la capacità termica di un materiale è data proprio dal prodotto della sua massa per il calore specifico caratteristico di quel materiale. La grande capacità termica degli oceani – così importante per il bilancio termico del nostro pianeta – è quindi dovuta sia al fatto che l'acqua ha un calore specifico alto, sia alla loro enorme quantità di acqua.

Ora, la lana è proprio una delle fibre tessili a maggiore calore specifico e minore conducibilità termica: è quindi il materiale ideale in cui avvolgerci per proteggerci dal freddo… e dal caldo. In effetti, essendo un ottimo isolante termico, quando la temperatura esterna è molto alta, ponendo il nostro corpo sotto un bel mantello di lana ci garantiamo il mantenimento della nostra temperatura corporea, senza correre il rischio di prendere colpi di calore.

Questo è il motivo per cui i beduini attraversano il deserto – dove di giorno la temperatura può arrivare anche a 50 °C – avvolti in pesanti caffettani di lana, preferibilmente bianchi o di colore chiaro. Gli oggetti chiari, infatti, assorbono meno calore di quelli scuri: per verificarlo, provate ad appoggiare per un istante la mano sul cofano di un'auto nera e sul cofano di un'auto bianca in una giornata di sole… facendo molta attenzione a non scottarsi!

Per la verità il nostro corpo è dotato anche di un ottimo meccanismo di termoregolazione che dissipa il calore in eccesso eventualmente accumulato: è la sudorazione. Infatti, quando il sudore evapora, porta via calore dalla nostra pelle, dandoci quella fantastica sensazione di fresco che può essere aumentata accelerando il processo di evaporazione. Per fare questo, è sufficiente agitare un ventaglio: il maggiore ricambio di aria agevola infatti l'evaporazione.

Per comprendere meglio il meccanismo, è interessante analizzare che cosa accade a livello microscopico. L'evaporazione è un processo di transizione di fase che porta una sostanza dallo stato liquido allo stato aeriforme.

Perché l'evaporazione abbia luogo, occorre che la sostanza assorba energia che, in questa circostanza, viene estratta proprio dal nostro corpo. Le molecole di acqua che compongono la goccia di sudore hanno una certa velocità di agitazione termica; in particolare, quelle delle gocce più calde saranno mediamente più veloci di quelle delle gocce più fredde.

La maggiore velocità delle molecole delle gocce calde fa sì che queste possano vincere le forze di coesione intermolecolare e scappare dalla superficie della goccia: questo è in effetti il processo di evaporazione. Ma se le molecole più veloci riescono a evaporare, a restare sono quelle più lente, con il risultato che l'energia interna totale del sistema corpo-sudore è complessivamente diminuita. Da cui deriva la sensazione di freschezza.

In pratica è lo stesso motivo per cui abbiamo freddo quando siamo bagnati: l'evaporazione dell'acqua presente sul nostro corpo assorbe calore da questo, raffreddandolo.

Forse qualcuno particolarmente attento ai fenomeni fisici si sarà accorto anche che la sensazione di fresco aumenta se al posto dell'acqua usiamo l'alcol (per esempio, per disinfettare una ferita). L'alcol, infatti, evapora molto più rapidamente dell'acqua e quindi sottrae calore dalla nostra pelle in un minor tempo.

Per inciso, è basandosi su questo principio che i venditori da spiaggia riescono a tenere freschi cocco e cocomeri anche quando la temperatura

esterna è molto alta. Tenendoli avvolti in un panno bagnato o versandoci sopra continuamente acqua, fanno in modo che questa, evaporando, estragga calore dal sistema acqua-frutto o acqua-panno-frutto, ottenendo così che il frutto non aumenti troppo la propria temperatura, diventando sgradevole se non addirittura immangiabile.

Tornando alle nostre coperte, occorre dire che esistono anche altri materiali adatti a conservare il caldo sotto le lenzuola. Fra questi troviamo le piume, anch'esse composte da materiale termoisolante, come ben sanno gli uccelli.

Ma la proprietà di isolamento termico di un piumone non è data solo dal fatto che è imbottito di piume. Al suo interno troviamo infatti molta aria, intrappolata tra le piume, la quale a sua volta è un ottimo isolante termico. Anzi: sono principalmente le sacche d'aria trattenute dalle piume a esercitare la funzione di isolamento termico richiesta.

Termocoperte, scaldini e borse dell'acqua calda

Se non vogliamo affrontare la sensazione di freddo del letto appena cambiato, è sempre possibile riscaldarlo prima di entrarci. Uno degli strumenti più efficaci in tal senso è sicuramente la termocoperta: due strati sovrapposti di lana, nell'intercapedine dei quali scorre un resistore che, al passaggio di corrente elettrica, si riscalda. Oppure si può usare la versione moderna del vecchio scaldino a brace, impiegato in passato per scaldare il letto in ambienti privi di riscaldamento. Anche nel caso dello scaldino moderno, detto "scaldino elettrico", si ha a che fare con una resistenza elettrica in grado di riscaldarsi al passaggio di corrente.

Ma in mancanza di corrente elettrica ci si può anche accontentare di una bella borsa piena di acqua calda da mettersi sotto i piedi che, insieme alle mani, sono fra le zone più fredde e più soggette a raffreddamento del nostro corpo.

Spesso, per motivi di sicurezza, ma anche per evitare che la temperatura del letto aumenti eccessivamente, termocoperte e scaldini elettrici sono

dotati di un *termostato*, un apparecchio tanto semplice quanto efficace.

In generale, la funzione del termostato è quella di mantenere costante la temperatura di un sistema. Nel caso che stiamo considerando si tratta di fissare la temperatura a cui vogliamo trovare il letto e impedire alla termocoperta o allo scaldino di superarla. Molti termostati si basano sul principio della dilatazione termica: tutti i materiali, infatti, quando vengono riscaldati si dilatano, allungandosi e aumentando di volume.

Accoppiando due lamine di metalli diversi – ovvero con coefficienti di dilatazione differenti – si ottiene come risultato che, all'aumentare della temperatura, uno dei due metalli si allunga più dell'altro, costringendo la lamina bimetallica a incurvarsi. In questo modo essa può attivare un interruttore che, collegato al sistema di controllo della temperatura, interrompe il passaggio di corrente attraverso il resistore. E la temperatura resta costante.

Naturalmente, se la temperatura per qualche motivo torna ad abbassarsi troppo, la lamina bimetallica perde la sua curvatura e torna diritta, chiudendo di nuovo il circuito elettrico: la corrente torna a scorrere fino a quando la temperatura non rientra nell'intervallo di valori prestabilito.

In realtà sono tantissime le proprietà dei materiali che dipendono dalla temperatura. È possibile quindi ideare termostati basati su altre caratteristiche, piuttosto che sulla dilatazione termica.

Attualmente, i termostati usati nelle apparecchiature elettroniche sono appunto quelli elettronici, basati sulla dipendenza dalla temperatura della conducibilità elettrica dei metalli, molto più precisi di quelli meccanici a lamina bimetallica. Dispositivi di questo tipo trovano largo impiego in tutti i settori in cui è importante controllare la temperatura di un sistema o di un ambiente: dai computer, ai condizionatori, dai forni agli scaldabagno, ai frigoriferi, ai congelatori. Chissà quanti termostati avete in casa senza saperlo!

Il trasporto del calore

Termocoperte, scaldini elettrici e borse dell'acqua calda trasferiscono

calore alle coperte e alle lenzuola del letto perché sono a contatto con esse. Fin qui abbiamo quindi parlato di trasferimenti di calore da un corpo più caldo a un altro più freddo quando questi sono a contatto.

Questa modalità di trasporto è nota con il nome di *conduzione* del calore, ma non è l'unica in cui il calore stesso può trasferirsi fra due corpi a temperature diverse. Esistono infatti anche l'*irraggiamento* e la *convezione*.

Il primo consiste nell'emissione di onde elettromagnetiche, le quali viaggiano a velocità della luce, propagandosi anche nel vuoto. Questo significa che un corpo caldo che perde calore per irraggiamento può arrivare a riscaldare anche un altro corpo molto distante. In effetti è questo il caso del Sole con la Terra.

La luce della nostra stella – composta da onde elettromagnetiche distribuite su un ampio spettro di frequenze – riscalda il nostro pianeta per irraggiamento. Quando è attivo questo meccanismo di trasporto del calore, la quantità di calore scambiata fra il corpo caldo e i corpi freddi che lo circondano è direttamente proporzionale alla quarta potenza della temperatura. L'irraggiamento, quindi, è un meccanismo molto efficace per sottrarre calore dai corpi, i quali possono restare caldi solo se hanno una sorgente di energia al loro interno, come accade appunto al Sole – nel cui nucleo si verificano reazioni di fusione termonucleare – e a noi che, come detto poco sopra, restiamo approssimativamente sempre alla stessa temperatura grazie al metabolismo.

Anche noi, perciò, perdiamo calore per irraggiamento, emettendo onde elettromagnetiche.

Tuttavia, a differenza del Sole che ha il suo massimo di emissione nella banda visibile dello spettro (in particolare nel giallo), noi emettiamo essenzialmente radiazione infrarossa, ovvero molto meno energetica. Questo dipende in ultima analisi dalla temperatura superficiale del corpo emittente: maggiore quella, minore la lunghezza d'onda della radiazione emessa. E la radiazione visibile, infatti, è a lunghezza d'onda minore di quella infrarossa.

Fra parentesi, i vecchi scaldini a brace riscaldavano il letto per irraggiamento, non per conduzione: la brace calda, infatti, emette radiazione elettromagnetica prevalentemente nella zona rossa dello spettro visibile e, soprattutto, nell'infrarosso vicino.

Il fatto che noi emettiamo radiazione infrarossa viene proficuamente sfruttato nei visori notturni. Questi dispositivi infatti sono dotati di sensori termici che evidenziano i corpi caldi, rendendoli facilmente riconoscibili sullo sfondo scuro di corpi generalmente molto più freddi dei nostri (alberi, muri ecc.). La radiazione infrarossa non sarebbe altrimenti visibile, in quanto i nostri occhi non sono sensibili a essa.

Naturalmente esiste anche il modo di ridurre le perdite di calore per irraggiamento. Uno dei metodi più semplici ed efficaci è quello impiegato per riscaldare le serre. La radiazione solare filtra infatti attraverso i vetri (o comunque i materiali trasparenti), andando a cedere energia alle piante e comunque a tutti i corpi che si trovano all'interno della serra.

A un certo punto, però, la temperatura interna della serra arriverà a essere maggiore di quella esterna. Per raggiungere nuovamente l'equilibrio termico, i corpi all'interno della serra dovrebbero cominciare a irraggiare, in virtù del fatto che sono più caldi dell'ambiente esterno e devono quindi cedergli parte della loro energia interna. E questo è proprio ciò che accadrebbe… se non fosse che il vetro è opaco alla radiazione infrarossa. Così, mentre la radiazione visibile proveniente dal Sole può entrare nella serra indisturbata, quella infrarossa riemessa dai corpi al suo interno resta intrappolata dentro, facendo aumentare la temperatura all'interno della serra.

Un processo analogo accade al nostro pianeta. La superficie terrestre, infatti, assorbe dal Sole radiazione visibile che poi riemette sotto forma di radiazione infrarossa, raffreddandosi. Le molecole dei gas presenti nell'atmosfera, in particolare quelle di anidride carbonica e vapor d'acqua, bloccano questa radiazione infrarossa assorbendola; in tal modo aumentano la loro energia, contribuendo al riscaldamento globale del Pianeta.

Ecco perché il fenomeno climatico, che consiste nel riscaldamento degli strati inferiori dell'atmosfera per effetto della schermatura che offrono alcuni gas in essa contenuti, prende il nome di *effetto serra*.

Infine abbiamo la *convezione*, che è un modo di propagazione del calore, attivo specialmente nei fluidi, attraverso spostamenti di massa all'interno dell'intero volume del fluido riscaldato.

Un esempio di convezione lo abbiamo quotidianamente sotto gli occhi quando riscaldiamo l'acqua per il tè o per la pasta. L'acqua in basso che riceve calore dal fondo della pentola direttamente a contatto con la fiamma si riscalda di più di quella che sta in alto. All'aumento di temperatura corrisponde una diminuzione di densità, così che l'acqua calda inizia a salire facendosi strada in mezzo agli strati superiori, più freddi. Questi, più pesanti, scendono verso il basso, dove, una volta riscaldati, risaliranno nuovamente e così via, in un ciclo continuo che riesce rapidamente a portare alla stessa temperatura tutta l'acqua della pentola.

Moti convettivi si osservano, per esempio, anche nell'atmosfera terrestre, dove l'aria in prossimità della superficie è più calda di quella in quota (grazie all'irraggiamento di cui sopra) e pertanto tende a salire. Un altro esempio interessante di trasporto del calore per convezione è quello che si osserva sulla superficie luminosa del Sole, la fotosfera, che fotografata ad alta risoluzione mostra una *granulazione* dovuta proprio ai moti convettivi. Bolle di gas caldo provenienti dall'interno, infatti, affiorano in superficie, mostrandosi più brillanti degli strati circostanti, più freddi, i quali a loro volta sono spinti verso il basso dal processo di convezione che riesce a distribuire il calore fra i diversi strati in maniera molto più efficiente di quanto farebbe il solo trasporto per conduzione.

A differenza di quanto accade nell'irraggiamento, nel trasporto del calore per convezione e per conduzione, la quantità di calore scambiata è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura fra i due corpi (o fra le due estremità dello stesso corpo).

Chiudiamo questo paragrafo ricordando che, in generale, a causa della loro particolare struttura atomica, i metalli sono buoni conduttori di calore

(argento, rame e oro, in particolare), mentre vetro, legno, carta e materie plastiche hanno conducibilità termiche molto basse e sono quindi cattivi conduttori di calore.

La differenza si nota benissimo se si confronta la sensazione di calore che proviamo nelle mani quando usiamo le posate di plastica o quelle interamente di metallo. In questo secondo caso, se la pietanza è particolarmente calda, rischiamo anche di bruciarci. Ecco perché spesso le posate di metallo hanno l'impugnatura di legno o di plastica: non è un fatto puramente estetico, serve soprattutto a evitare che le nostre mani siano piene di ustioni!

Tic tac, tic tac... Driiiiin!

Stiamo dormendo in un letto morbido e caldo, quando all'improvviso il suono della sveglia ci fa sussultare: è mattina, e dobbiamo alzarci e prepararci per accompagnare i nostri figli a scuola e poi correre al lavoro. La nostra giornata è inesorabilmente scandita da un insieme di orari, e sveglie, orologi, telefonini e palmari con avvisi sonori ci avvertono che non possiamo fermarci per non essere continuamente in ritardo.

L'orologio è forse lo strumento più tiranno che sia mai stato inventato. Non ci lascia tregua: avanza sempre, secondo dopo secondo, senza che nessuno di noi possa mai esclamare: «Attimo fermati, sei così bello!» come fa dire Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832) al suo Faust. Ma da dove ha origine il concetto di tempo?

Fratello Sole, sorella Luna, cugine stelle...

Lo studio del sistema solare ha mostrato l'esistenza di satelliti con orbite caotiche, cioè non descrivibili con traiettorie a periodicità determinata. Il nostro pianeta, d'altro canto, ha invece nel suo moto manifeste periodicità, quali l'alternarsi del giorno e della notte e il mutare regolare delle stagioni.

È molto probabile che la prima concezione intuitiva dello scorrere del tempo sia da riferirsi a questo volgere *ciclico* dei fenomeni naturali

osservati dall'uomo, per cui, per esempio, era possibile individuare la *durata* del giorno attraverso l'osservazione ripetuta di due tramonti successivi.

Proviamo invece a immaginarci ipotetici abitanti di un mondo caotico nel senso precedentemente descritto: riusciremmo a sviluppare naturalmente una concezione dello scorrere del tempo, legata all'osservazione della regolarità del manifestarsi di alcuni fenomeni naturali? Probabilmente no, o perlomeno non nel modo in cui noi, abitanti del pianeta Terra, la intendiamo.

Gli studi di archeoastronomia, scienza che si occupa dello studio di tracce archeologiche di costruzioni edificate per le osservazioni astronomiche, hanno chiaramente mostrato come anche gli uomini primitivi cercassero di mettere ordine nel susseguirsi degli eventi terreni. L'osservatorio megalitico di Stonehenge in Inghilterra – la cui costruzione risale a circa 4500 anni fa – è forse il caso più evidente di questa ricerca di regolarità.

Questa ricerca sfocerà poi nella realizzazione, da parte di diverse civiltà, di complessi strumenti per il computo del trascorrere del tempo, i calendari, tipicamente basati sull'osservazione delle periodicità nei moti del Sole e della Luna. Un esempio di calendario basato su queste osservazioni lo abbiamo costantemente sotto gli occhi: il nostro calendario – che approfondiremo a breve – suddivide infatti la durata dell'anno, cioè il tempo di una rivoluzione apparente del Sole in cielo, in dodici mesi, essendo il mese, in prima approssimazione, proprio il tempo necessario alla Luna per compiere una rivoluzione attorno alla Terra.

Il tempo, quindi, già in una concezione intuitiva, è legato ai princìpi di durata e mutamento. Sant'Agostino (354-430), in un celebre passo delle *Confessioni* si espresse così: «Che cos'è dunque il tempo? Se nessuno me lo domanda, lo so. Se devo spiegarlo a qualcuno, non lo so. Nondimeno so che, se nulla passasse, non vi sarebbe un tempo passato e, se nulla cambiasse, non vi sarebbe un tempo presente».

È chiaro come il *passare* di Agostino sia da riferirsi al concetto di durata,

mentre il *cambiare* sia legato al mutamento: è questo il più tipico esempio della cosiddetta *posizione relazionale* del tempo, ove esso serve cioè soltanto a esprimere il mutare delle cose, il divenire della materia.

Il tempo, anche in Agostino, viene quindi inteso come un parametro che permette la descrizione dei fenomeni. Ma, come è facilmente intuibile e sotto gli occhi di tutti, occorre definire, per un evento, non solo *quando* avviene e *quanto* dura, ma anche *dove* accade. Ecco quindi che sorge spontaneo il legame fra tempo e spazio: sono proprio questi a delimitare il teatro di coordinate in cui studiare i fenomeni naturali e descriverne l'evoluzione.

Pur dopo il lavoro di tanti scienziati e filosofi, questa concezione del tessuto spaziotemporale come teatro di coordinate (o come sfondo) necessario a esprimere parametricamente il divenire delle cose rappresenta ancora oggi la posizione dominante in fisica. Esprimendola nel linguaggio dell'epistemologia operativa, una grandezza fisica è definita dall'insieme di operazioni atte a misurarla (definizione operativa). Perciò lo spazio (relativo) è una nozione legata alla convenzione scelta per misurare le lunghezze fisiche degli oggetti, mentre il tempo (relativo) è sostanzialmente definibile come la sequenza ordinata scandita da quel particolare sistema fisico *periodico* scelto convenzionalmente come cronometro (oscillazioni del pendolo, rotazione della Terra, transizioni atomiche ecc.).

La misura del tempo

Eccoci dunque a cercare di capire come viene misurato il tempo. Nel corso dei secoli l'umanità si è ingegnata a ideare strumenti che potessero contare il tempo, dalle meridiane, basate sul rilevamento della posizione del Sole, alle clessidre (ad acqua o a sabbia), ai pendoli, fino ai moderni orologi e cronometri. Tutti questi strumenti, basati appunto sulla periodicità di alcuni fenomeni, scandiscono il trascorrere del giorno con regolarità.

Ma il giorno scorre veramente con regolarità? Avremmo bisogno di un

intero libro per dare una risposta esauriente a questa domanda, qui siamo pertanto costretti a tratteggiare solo per grandi linee la questione.

Intanto proviamo a definire il giorno come la misura di una rotazione terrestre. Già, ma calcolata rispetto a quale riferimento?

Se infatti prendiamo le stelle che sono sufficientemente lontane e possono, con ottima approssimazione, essere considerate fisse (anche se in realtà si muovono anche loro, seppure in maniera impercettibile), possiamo definire il cosiddetto *giorno siderale* che corrisponde all'intervallo di tempo fra due culminazioni consecutive di una data stella in un luogo fissato (la culminazione consiste nel passaggio di un astro sul meridiano locale, cioè su quella linea immaginaria che congiunge il punto cardinale nord con il punto cardinale sud, passando per lo zenit del posto, cioè il punto esattamente sopra le nostre teste).

Ma possiamo anche scegliere il Sole e definire il *giorno solare* come il tempo intercorso fra due passaggi consecutivi al meridiano del luogo.

Ma giorno siderale e giorno solare non coincidono: nell'arco di un giorno, infatti, il Sole si sposta dal punto in cui era stato osservato (a causa del moto di rivoluzione del nostro pianeta attorno al Sole, appunto), così che la Terra è costretta a ruotare un altro po' per ritrovare il Sole al meridiano. Questo significa che il giorno solare è leggermente più lungo di quello siderale: la differenza ammonta in media a circa 4 min. Ogni giorno, quindi, il Sole si sposta rispetto allo sfondo delle stelle fisse, sfasando gli orologi solari da quelli siderali (esistono anche questi e, naturalmente, sono impiegati negli osservatori astronomici).

Bene, potremmo dunque scegliere un qualunque giorno solare – dopo tutto è sulla presenza della luce del Sole che basiamo le nostre attività quotidiane – suddividerlo in 24 ore, suddividere ogni ora in 60 min, ogni minuto in 60 s, e pensare di aver sistemato tutto.

Purtroppo, però, non è così. Perché la Terra orbita attorno al Sole percorrendo non una circonferenza, ma un'ellissi. In altre parole, il nostro pianeta non è sempre alla stessa distanza dal Sole, ma si avvicina e si allontana da questo.

Ora si dà il caso che un pianeta su un'orbita ellittica non viaggi sempre alla stessa velocità, ma si muova più rapidamente quando è vicino al Sole e più lentamente quando ne è lontano. Questo ha grosse implicazioni sullo sfasamento di cui abbiamo parlato poco sopra: quando la Terra è più vicina al Sole, lo spostamento apparente del Sole in cielo sarà maggiore di quando la Terra è più lontana.

La conseguenza è che il giorno solare, detto *giorno solare vero*, non è di durata costante, ma è diverso tutti i giorni dell'anno. Fra il giorno solare vero più lungo e quello più breve c'è una differenza di addirittura 52 s.

Oltre a questo c'è anche un altro problema, legato al fatto che il piano dell'orbita terrestre – chiamata eclittica, corrispondente al cammino apparente del Sole in cielo – è inclinato rispetto all'equatore terrestre di 23° 27', con ulteriori complicazioni sul moto apparente del Sole stesso (scriviamo *apparente* perché in realtà non è lui a muoversi, ma siamo noi, ma dal nostro punto di vista è il Sole che *appare* muoversi).

Allora gli astronomi hanno escogitato un trucco inventandosi un *Sole medio* che si muove con velocità uniforme lungo l'equatore invece che lungo l'eclittica. Con il Sole medio in tasca, è possibile a questo punto definire il giorno solare medio (detto anche *giorno civile*) che sarà di durata costante, uguale in tutti i giorni dell'anno.

I nostri orologi è appunto questo che misurano: il giorno civile, suddiviso in 24 ore medie, a loro volta suddivise in 60 min medi, a loro volta suddivisi in 60 s medi. Poco importa, dal punto di vista delle nostre attività quotidiane.

La differenza che si misura fra giorno solare vero e giorno solare medio, chiamata *equazione del tempo* (qui il termine *equazione* viene usato con il significato di correzione) e dovuta, lo ripetiamo, alla combinazione dell'eccentricità del nostro moto orbitale e dell'inclinazione dell'asse di rotazione rispetto al piano dell'eclittica, è infatti al massimo attorno al quarto d'ora.

A questo punto sembra fatta. Ma il tempo, si sa, è un osso duro da trattare.

Fin qua abbiamo infatti definito il giorno e le frazioni di giorno grazie alle osservazioni astronomiche, lasciando implicitamente intendere che queste siano affidabili, ovvero che i fenomeni impiegati nelle definizioni – moto di rotazione della Terra attorno al proprio asse e moto di rivoluzione della Terra attorno al Sole – siano perfettamente periodici e non sgarrino di una frazione di secondo.

Ormai da tempo, fisici e astronomi sanno però che non è così. In particolare, a causa delle maree – ovvero dell'azione gravitazionale esercitata sulle masse fluide, atmosfera e oceani, del nostro pianeta da parte di Sole e, principalmente, Luna – il moto di rotazione della Terra sta rallentando. Ma l'attrito causato dalle maree è solo uno dei tanti fattori che rendono l'orologio Terra piuttosto impreciso, almeno dal punto di vista dei fisici.

In ogni caso, solo questo fa aumentare la lunghezza del giorno medio di circa 16 millesimi di secondo al secolo. Ecco dunque il motivo per cui sono andati in cerca di moti periodici più sicuri e stabili. Trovandoli nel mondo degli atomi.

Nel 1967 venne quindi deciso che la definizione di secondo non avesse più derivazione astronomica (fino al 1956 il secondo era definito come l'86.400entesima parte del giorno solare medio, poi fino al 1967 si definì stabilendo che l'anno tropico – di cui parleremo a breve trattando il calendario – durasse 31.556.925,9747 s), ma atomica: fu così che il secondo divenne la durata di 9.192.631.770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione fra due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'isotopo 133 di Cesio.

L'espressione "transizione fra due livelli" significa semplicemente che un elettrone che salta dal livello energetico più alto a quello più basso emette un'onda elettromagnetica di frequenza pari a 9.192.631.770 Hz, ovvero circa 9,2 GHz, la cui energia è esattamente pari al dislivello energetico esistente fra quei due livelli.

Grazie a una serie di controlli elettronici e di verifiche incrociate con vari orologi atomici dislocati in varie parti del mondo, è possibile determinare

con estrema accuratezza la durata del secondo e definire una scala di Tempo Atomico Internazionale (TAI), tenuta sotto controllo dal *Bureau international des poids et mesures di Sèvres*, un sobborgo di Parigi.

Con una serie complessa di passaggi, questa scala, utile per le esigenze di precisione degli scienziati, ma totalmente slegata dalle esigenze della vita pratica, connesse al susseguirsi del giorno e della notte, viene raccordata con la scala astronomica, data dal Tempo Universale (TU, ma spesso si trova anche UT, dall'inglese Universal Time), definito come il tempo solare medio sul meridiano fondamentale di Greenwich. Così, pur essendo l'uno indipendente dall'altro, è sempre possibile ricavare il TAI dall'UT e viceversa. In realtà, poiché l'UT è irregolare, è stata infine definita un'altra scala, detta *Scala del Tempo Universale Coordinato* (TUC o UTC) che rappresenta un compromesso fra il tempo atomico e quello astronomico.

In pratica, in questa nuova scala la lunghezza del secondo è definita dagli orologi atomici, mentre il numero di secondi in un anno è dato dalle osservazioni astronomiche. Naturalmente esiste un legame fra TAI e UTC che permette di ricavare il primo dal secondo e viceversa.

Bene, ma con tutti questi tempi atomici, astronomici e misti, quando alla radio o in televisione danno il famoso *segnale orario*, a quale scala si riferiscono? Adesso abbiamo la risposta: il tempo del segnale orario è l'UTC.

L'UTC è anche la scala dei tempi impiegata dalla costellazione di satelliti GPS (*Global Positioning System*), quelli che danno le coordinate esatte del luogo in cui ci troviamo. Così, ammesso che si abbia un ricevitore GPS (come quello presente nel navigatore delle automobili), si avrà sempre a disposizione anche l'ora esatta.

Che ore sono, per favore?

Da quanto detto sin qui, mai risposta fu più complessa. Eppure noi ci affrettiamo a guardare l'orologio per rispondere con estrema sicurezza al nostro occasionale interlocutore in quale momento della giornata ci

troviamo. Forse ignari – fino a oggi – del grande lavoro fatto da astronomi, fisici e ingegneri per mettere d'accordo tutti sull'ora appena letta sull'orologio. L'unico strumento di misura che ci portiamo sempre addosso: molti anche sotto la doccia, alcuni addirittura a letto.

La nascita dell'orologio come noi lo conosciamo è stata lunga e difficile. Ma porta il nome di un uomo che, con coraggio e tenacia, volle dimostrare al mondo la sua capacità di costruire l'orologio che risolvesse una volta per tutte l'annoso problema della longitudine. Quest'uomo era l'inglese John Harrison (1693-1776) che accettò la sfida lanciata nel 1714 dal *Board of Longitude*, ufficio istituito dal governo britannico appositamente per risolvere il problema delle longitudini in mare, il quale mise in palio ben ventimila sterline dell'epoca (equivalenti ad alcune decine di milioni di euro di oggi) a chi fosse riuscito in tale intento.

Il problema è presto detto. Per individuare univocamente la propria posizione in mare (ma il ragionamento vale anche sulla superficie terrestre, tenendo conto della quota) occorrono due coordinate: la *latitudine*, ovvero la nostra posizione a nord o a sud rispetto all'equatore, e la *longitudine*, ovvero la nostra posizione a est o a ovest rispetto al meridiano di riferimento (quello di Greenwich, *of course*!).

Ma se la determinazione della latitudine di un luogo è molto semplice – è sufficiente misurare l'altezza di una stella o del Sole al momento della culminazione per poterla calcolare –, non altrettanto facile è conoscere la longitudine, perché essa implica che si conoscano esattamente due orari: quello del meridiano di riferimento e quello del meridiano locale, cioè del meridiano del luogo in cui ci troviamo. È infatti grazie alla differenza fra questi due valori che si determina la longitudine di un luogo.

Naturalmente un bravo marinaio era sempre in grado di conoscere l'ora locale (aiutato dal Sole o dalle stelle), ma per conoscere l'ora del meridiano di riferimento – in mancanza di strumenti per comunicare a distanza – occorreva portarsi dietro un orologio che battesse il tempo di Greenwich, senza commettere errori. Il rischio era quello di perdersi in mare, o di andare a sbattere contro gli scogli in caso di nebbia (in realtà il

problema delle longitudini può essere risolto anche con altri metodi astronomici, ma l'uso dell'orologio è di gran lunga il metodo più semplice!).

Harrison dedicò gran parte della sua vita a costruire orologi (cinque orologi, per la precisione) che, però, cambiarono la storia della navigazione (e non solo quella). Fra il 1730 e il 1759 costruì i primi quattro, dall'H1, il primo, pesante e ingombrante, all'H4, di appena 13 cm di diametro e pesante meno di 1 kg e mezzo, ma soprattutto in grado di commettere un errore di appena 5 s – equivalenti a un errore lineare inferiore a un miglio e mezzo, quindi meno di 3 km – dopo oltre 5 mesi di traversata oceanica.

L'ultimo, l'H5, replica perfetta dell'H4, iniziò a costruirlo quando ormai aveva più di settant'anni. L'H1 venne presentato alla commissione del *Board of Longitude* nel 1735, oltre 20 anni dopo l'istituzione del premio. Questo era il primo vero cronometro marino, in grado di conservare l'ora indipendentemente dal tempo meteorologico, dalla dilatazione e dalla contrazione dei metalli al variare della temperatura, ma, soprattutto, dai movimenti di rollio e beccheggio della nave.

Come aveva fatto? Certamente non usando un pendolo. Era infatti già noto che l'orologio a pendolo, per funzionare correttamente, deve stare fermo: qualunque moto o accelerazione influenza infatti le sue oscillazioni, causando errori nella scansione del tempo.

L'idea di Harrison fu dunque quella di usare come organo regolatore dell'orologio (si chiama così la parte che oscilla in maniera periodica) non un sistema basato sulla forza di gravità, ma sulla forza elastica di richiamo di due molle orizzontali.

Nonostante già l'H1 desse risultati più che soddisfacenti, Harrison non ricevette subito il premio, ma fu costretto dal *Board of Longitude* a continuare a lavorare sui suoi orologi per migliorarne ancora di più le prestazioni. Anche perché fra i membri della commissione si trovava l'astronomo reale Nevil Maskelyne (1732-1811), il quale, avendo anch'egli nettamente migliorato il metodo astronomico di determinazione

della longitudine basato sull'osservazione della posizione della Luna, aveva tutto l'interesse a non premiare Harrison, perché sperava di essere lui stesso il vincitore: un caso davvero clamoroso di conflitto di interessi!

Infatti, fu solo grazie alla clemenza del re Giorgio III (1738-1820) e all'entusiasmo del navigatore James Cook (1728-1779), il quale aveva fatto un lungo viaggio di 3 anni nell'oceano Pacifico con a bordo l'orologio K1, copia esatta dell'H4 realizzata dall'orologiaio Larcum Kendall (1719-1790) che Harrison, ormai vecchio, si vide riconosciuti tutti i meriti e gli onori del suo lavoro.

Dopo Harrison molti altri hanno apportato ulteriori perfezionamenti al cronometro marino e agli orologi in generale. Fino a quando, verso gli anni Trenta del secolo scorso, non si cominciarono a studiare i cristalli di quarzo, i quali, sottoposti a un piccolo campo elettrico, hanno la proprietà di vibrare con estrema regolarità a una frequenza molto alta, tanto da essere in grado, anche quelli più economici, di commettere al massimo in un anno l'errore di un solo minuto.

I fusi orari

Ogni primo gennaio in Italia si fa la classica corsa al primo nato dell'anno. Ma forse non tutti sanno che è una corsa inutile, perché qualcuno l'ha già vinta da diverse ore. Quand'anche una bimba o un bimbo nascessero alla mezzanotte esatta del 1° gennaio, sarebbero comunque stati battuti da tutti quelli nati in quei Paesi che, per motivi di fuso orario, hanno visto arrivare l'inizio dell'anno prima dell'Italia. Certo, perché mezzanotte in Italia, significa per esempio che a Mosca sono già le 2 di notte, a Pechino le 7 di mattina, a Tokyo le 8, a Sidney le 9, a Wellington, capitale della Nuova Zelanda, addirittura le 11. Ovviamente del 1° gennaio. Così, un bambino nato alla mezzanotte di Tokyo, quando la mezzanotte scoccherà in Italia, avrà già compiuto 8 ore!

Ma allora dove sorge il primo Sole dell'anno? A guardare gli orari delle città sopra citate, sembrerebbe che spostandoci verso est si aumenti costantemente l'ora del fuso di appartenenza, ma, se continuiamo a

spostarci e da Wellington arriviamo a Honolulu, capitale dello stato americano delle Hawaii, di due fusi più a est, scopriamo che qui non sono le 13 del 1° gennaio, ma siamo ancora alle 13 del 31 dicembre. Che cosa è successo, allora? Siamo andati indietro nel tempo? No, ovviamente. Abbiamo soltanto attraversato la cosiddetta *linea del cambiamento di data*, traccia convenzionale posta sul meridiano opposto a quello di riferimento di Greenwich, ossia a 180° di longitudine (est o ovest, qui non fa differenza).

Certo, perché il problema è solo e soltanto un problema di longitudine, come quello di Phileas Fogg, fortunato viaggiatore nel *Giro del mondo in 80 giorni* di Jules Verne (1828-1905) o dello sfortunato protagonista dell'*Isola del giorno prima* di Umberto Eco (nato nel 1932), naufragato proprio in prossimità di questa fantomatica linea del cambiamento di data, traccia apparente, convenzionale, ma fondamentale per chi si trovi, viaggiando, ad attraversarla.

Infatti, in ogni momento dopo la mezzanotte locale, se a est di questa linea è, per esempio, il 31 dicembre 2008, a ovest sarà già il 1° gennaio 2009.

Ma dove si trova questa linea? Nel 1884, a un Congresso internazionale a Washington venne stabilito convenzionalmente che il meridiano fondamentale fosse quello di Greenwich. Ma poiché non era possibile regolare la vita civile di tutte le Nazioni sulla base dell'ora di quel meridiano, la Terra venne divisa lungo i meridiani in 24 spicchi, detti *fusi orari*, all'interno dei quali tutte le località dovevano avere l'ora del meridiano centrale del fuso. L'Italia si trova nel secondo fuso, detto *Tempo Medio dell'Europa Centrale* (TMEC; talvolta è anche indicato con la sigla CET, da *Central European Time*, ovvero tempo centrale europeo), un'ora in più rispetto a quella del meridiano di Greenwich, a 180° di distanza dal quale si trova appunto la linea del cambiamento di data, ovvero il meridiano opposto.

Così, quando a Londra – l'Osservatorio di Greenwich si trova alla periferia della capitale britannica – il Big Ben batterà i 12 rintocchi del

mezzogiorno del 31 dicembre, da noi saranno le ore 13 dello stesso giorno, ma per tutti i luoghi immediatamente a ovest della linea del cambiamento di data sarà da pochissimo passata la mezzanotte del 1° gennaio (mentre per quelli immediatamente a est sarà da poco scoccata la mezzanotte del 31 dicembre)! Questo significa che il primo nato dell'anno arriva quando da noi è ancora primo pomeriggio del 31.

Adesso possiamo finalmente rispondere alle domande che ci siamo posti poco fa.

Tenendo conto delle deviazioni convenzionali imposte alla linea sopra citata per motivi di ordine pratico, il primo territorio a beneficiare dell'arrivo dell'anno nuovo è – a meno di spostamenti di confini o di fusi – l'arcipelago polinesiano delle isole Tonga, sperduto nell'immensità dell'oceano Pacifico. Meno di 100.000 abitanti distribuiti su 750 km2 costituiti da quasi 200 isole e isolette di origine vulcanica, governati da una monarchia costituzionale ereditaria. Se decidete di andarle a visitare, ricordatevi di prendere l'aereo per Nuku'alofa: è la capitale.

Almanacchi, almanacchi nuovi; lunari nuovi! Bisognano, Signore, almanacchi?

È così che comincia lo splendido *Dialogo di un venditore di almanacchi e di un passeggere* di Giacomo Leopardi (1798-1837). Anche noi, alla fine di ogni anno, ci mettiamo in cerca di qualche bel calendario da appendere in casa o da regalare agli amici, con la speranza che sia di buon auspicio per l'anno nuovo. Ma sappiamo veramente da dove trae le proprie origini il nostro calendario?

Possiamo definire il calendario come un sistema adottato dall'uomo per suddividere, calcolare e dare un nome ai vari periodi di tempo. Questi nomi vengono definiti date del calendario. Quasi tutti i calendari si basano su alcune unità di tempo fondamentali: il giorno, di 24 ore; la settimana, di 7 giorni; il mese, di circa 4 settimane; l'anno, in genere di 12 mesi.

Quando gli uomini hanno iniziato a misurare il tempo, il giorno si è imposto come la più naturale unità di misura, come elemento regolatore

della vita di tutti gli esseri viventi, anche se la suddivisione del giorno in sottounità si presenta diversa nelle varie civiltà.

Le basi astronomiche del calendario, dunque, sono le seguenti:

- il *giorno* è il tempo di una rotazione terrestre. La sua durata non è costante ma aumenta di circa 0,002 s al secolo. Attualmente vale 86.400 s di tempo dinamico terrestre, che è un tempo atomico e quindi costante;
- l'*anno tropico*, o delle stagioni, è il tempo tra una primavera e la successiva. La sua durata è rimasta mediamente la stessa in miliardi di anni, ma va incontro a piccole oscillazioni;
- il *mese sinodico* è il tempo che intercorre fra due noviluni successivi. La sua durata sta aumentando a causa del trasferimento di energia rotazionale terrestre all'orbita lunare attraverso le maree. La durata media è di 29,53 giorni circa.

Per definizione, la durata del mese sinodico e dell'anno tropico sono espresse in giorni di 86.400 s di tempo atomico, quindi non dipendono (più) dal rallentamento della rotazione terrestre.

Sia l'anno che il mese sinodico non sono commensurabili con il giorno, cioè non contengono un numero intero di giorni, né di loro sottomultipli. Se un valore frazionario va benissimo per l'uso astronomico, però, non è ammissibile per l'uso civile. D'altra parte, come sostenuto dall'astronomo tedesco Cristopher Clavius (1538-1612), il principale artefice della riforma gregoriana del calendario, *annum civilem necessario constare ex diebus integris* (è necessario che l'anno civile sia formato di giorni interi), per cui occorre trovare una soluzione a questo inconveniente.

La soluzione è l'*intercalazione*: a un certo numero di anni di 365 giorni si fa seguire un anno di 366, oppure a un mese lunare di 29 giorni si fa seguire un mese di 30 e così via. Occorre comunque introdurre altri meccanismi correttivi. Infatti, nessuna intercalazione è per sempre, perché non modifica l'incommensurabilità e la variabilità dei periodi.

Così, paese (e tempo) che vai, calendario che trovi, a seconda del metodo scelto di intercalazione. Ciascuna nazione adotta un proprio calendario ufficiale per definire le festività e identificare le date in modo univoco.

La maggior parte dei Paesi del mondo, nonché le organizzazioni sovranazionali come l'ONU, adottano il calendario gregoriano, alcuni Paesi musulmani adottano il calendario islamico, Israele adotta il calendario ebraico. Altri Paesi o altre religioni adottano calendari diversi.

Da quanto detto si comprende che le unità di tempo fondamentali su cui si basano i calendari sono ricavate dall'osservazione del Sole e della Luna:

- la *settimana* corrisponde approssimativamente alla durata di una fase lunare;
- il *mese* corrisponde alla durata di un ciclo completo di fasi, cioè a 4 settimane;
- l'*anno* corrisponde alla durata di un ciclo di stagioni, cioè a un periodo di rivoluzione della Terra intorno al Sole (anche se non esattamente, a causa della precessione degli equinozi).

Tuttavia, poiché un anno solare non corrisponde a un numero intero di mesi lunari (il rapporto è di circa 12,3683), i calendari seguono in genere o l'uno o l'altro dei due cicli. Inoltre, anche la durata media di una fase lunare non è esattamente di 7 giorni (precisamente è di circa 7,3826 giorni): per questo motivo le fasi non iniziano sempre lo stesso giorno della settimana.

A seconda della base astronomica prescelta (anno tropico, mese lunare, una combinazione di entrambi), si distinguono essenzialmente 3 diversi tipi di calendari:

- i *calendari solari* sono basati sulla durata dell'anno solare, o anno tropico, di circa 365 giorni. Le stagioni iniziano sempre nelle stesse date (queste date tuttavia possono spostarsi molto lentamente nell'arco dei secoli), ma i mesi non seguono esattamente il ciclo delle fasi lunari. Esempi di calendari solari sono il calendario gregoriano e il calendario giuliano;
- i *calendari lunari* sono basati sulla durata del mese lunare, di circa 29 giorni e mezzo. In questi calendari il mese inizia sempre con la Luna Nuova, ma la data d'inizio delle stagioni si sposta in avanti da un anno all'altro (in media di circa 11 giorni). Un esempio è il calendario

islamico;
- i *calendari lunisolari* sono sincronizzati sia con la durata dell'anno tropico, sia con quella del mese lunare. Per poter mantenere questa sincronia, alternano anni di 12 e di 13 mesi. In questi calendari la data d'inizio delle stagioni si sposta in avanti o indietro da un anno all'altro, ma si mantiene sempre vicina (entro 12-13 giorni) a una data fissa. Un esempio è il calendario ebraico.

Il calendario giuliano, frutto della riforma del calendario romano voluta da Giulio Cesare (100 a.C.-44 a.C.) nel 46 a.C. e in uso fino a 4 secoli fa, fissava la durata dell'anno in: 365,25 giorni, vale a dire 365 giorni e 6 ore. Di qui la necessità di aggiungere un giorno ogni quattro anni per sincronizzare il calendario civile con gli equinozi. La differenza di soli 11 m 14 s rispetto all'anno tropico può apparire modesta, ma si è accumulata nel tempo e ha fatto sì che, 16 secoli dopo, l'equinozio di primavera cadesse nel giorno che il calendario indicava come 11 marzo anziché 21 marzo. L'errore fu corretto o, dovremmo dire, fu mitigato dalla riforma gregoriana.

Questa riforma, voluta da papa Gregorio XIII (Ugo Buoncompagni, 1502-1585), venne introdotta nel 1582 con un meccanismo di recupero dei giorni persi e di riduzione massima dello scarto fra la durata dell'anno tropico e quella dell'anno civile. Sulla base di osservazioni più precise rispetto a quelle dell'epoca romana fu infatti proposto un anno civile della durata di 365,2425 giorni, pari a 365 d 5 h 49 m 12 s, che differisce di soli 26 s da quello effettivo, cioè tropico.

La riforma gregoriana si articolava in sostanza in due punti. Innanzi tutto, occorreva raccordare il calendario dell'epoca all'anno tropico. Per questo fu necessario eliminare 10 giorni dell'anno 1582. Venne quindi stabilito che il giorno successivo a giovedì 4 ottobre 1582 sarebbe stato venerdì 15 ottobre 1582.

Inoltre, per evitare che si producessero nuovamente gli effetti di uno scarto, fu decretata l'eliminazione di 3 giorni ogni 400 anni con la modifica della successione dei giorni bisestili che, da allora, non sono 1 su

4 ma 97 su 400, saltando gli anni di fine secolo non divisibili per 400: quindi 1700, 1800, 1900, 2100 ecc. non sono bisestili, mentre 1600, 2000, 2400 ecc. sono bisestili. Ecco dunque spiegato l'arcano del 2000 bisestile!

La riforma gregoriana ebbe un'affermazione graduale, legata naturalmente alla diffusione della religione cattolica. Così, in Italia, Spagna e Portogallo venne introdotta immediatamente, passando dal 4 al 15 ottobre 1582, in Francia si aspettò il mese di dicembre dello stesso anno (passando dal 9 al 20 del mese), nelle province cattoliche della Germania e Svizzera l'adozione avvenne passando dal 21 dicembre 1583 al 1° gennaio 1584. I Paesi protestanti (come gran parte di Germania e Svizzera, e l'Inghilterra) adottarono la riforma gregoriana molto più avanti, nel corso del Settecento. Si è invece dovuto attendere il XX secolo perché la riforma gregoriana si affermasse anche nei Paesi cristiani ortodossi.

Queste differenze fra i calendari impiegati anche in Paesi dello stesso continente hanno causato alcune interessanti curiosità storiografiche, come, per esempio, quella legata alla data di nascita di Isaac Newton. Tutti sanno infatti che il grande fisico inglese nacque il 25 dicembre del 1642, ovvero alla fine dello stesso anno in cui morì Galileo, in un ideale passaggio di testimone. In realtà, però, dato che in Inghilterra il calendario gregoriano venne introdotto solo nel 1752, quella data si riferisce ancora al calendario giuliano allora vigente in quel Paese, cosicché risulta che, per il calendario gregoriano, Newton è nato il 4 gennaio 1643.

Altra curiosità interessante è quella legata alla rivoluzione russa del 1917, passata alla storia con il nome di *rivoluzione d'ottobre*. Purtroppo per gli storici, però, quell'ottobre si riferisce al calendario giuliano (la riforma gregoriana venne infatti introdotta dal governo sovietico insediatosi dopo la rivoluzione), così l'occupazione a San Pietrogrado del Palazzo d'Inverno – sede del governo provvisorio insediatosi dopo la caduta dello zar – da parte dei bolscevichi avvenne la mattina del 25 ottobre del calendario giuliano, corrispondente al 7 novembre di quello gregoriano. Ecco spiegato il motivo per cui le celebrazioni della *rivoluzione d'ottobre* vengono fatte a novembre!

Avevate mai immaginato quanto lavoro ci fosse stato dietro la costruzione del nostro calendario?

Entropia, probabilità, informazione

Dopo aver descritto il funzionamento del calendario, torniamo ancora un po' a ragionare sul concetto di tempo che è fra i più intriganti e misteriosi della scienza. Le ricerche di Albert Einstein (1879-1955) che sfociarono nella teoria della relatività, giunsero a dimostrare che spazio e tempo sono intimamente connessi in un continuo di coordinate e intrinsecamente simmetrici. Eppure c'è qualcosa che appare stonato. Se davvero il tempo è una coordinata come lo spazio, perché non è simmetrico? Perché esistono un passato e un futuro? Perché in relazione allo spazio ci possiamo muovere in qualunque direzione mentre nel tempo non possiamo far altro che andare in avanti, verso il futuro? E infine, perché nel tempo esiste un istante privilegiato, l'ora, il presente, mentre nello spazio ogni punto è equivalente?

Non c'è certamente bisogno di sottolineare come questo genere di domande abbiano continuamente assillato la mente di filosofi e scienziati illustri, e come, ancora oggi, il problema sia ben lungi dall'essere esaurito, se mai potrà esserlo. La fisica può comunque aiutarci a chiarire meglio i termini del problema e a indicarci una possibile soluzione.

Come già accennato, nell'antichità vi era sicuramente una tendenza a recepire l'aspetto ciclico del tempo piuttosto che quello lineare. Lo scorrere del tempo viene infatti identificato con il susseguirsi di fenomeni periodici di carattere astronomico (alternarsi del giorno e della notte, alternarsi delle stagioni, variazioni delle fasi lunari ecc.).

Alcune civiltà giungono addirittura ad affermare che il mondo è ciclico e che gli eventi si ripeteranno identici all'infinito (concezione dell'eterno ritorno). Esistono tuttora religioni che affermano questa ciclicità e che di questa ciclicità fanno la loro forza. A queste religioni non appartiene il Cristianesimo. Infatti, se adesso noi occidentali siamo più propensi a

scorgere nello scorrere del tempo la dimensione lineare più della ciclicità, lo dobbiamo proprio al pensiero cristiano, nel quale viene per la prima volta esaltata l'irreversibilità del tempo. Nella religione cristiana esiste infatti un momento di rottura fra un passato di ignoranza e un futuro di consapevolezza: è l'incarnazione del figlio di Dio, che avviene una sola volta nella storia dell'umanità.

E dato che il tempo ciclico non ammette l'espressione *una sola volta*, è costretto per questo a cedere il passo al tempo lineare. Da questo momento la linearità e la continuità del tempo diventano canoni fondamentali del pensiero occidentale, e in particolare di quello scientifico.

Ci potremmo a questo punto porre la domanda se il tempo scorra veramente o non sia piuttosto un'illusione dei nostri sensi. E poi, se scorresse veramente, a che velocità scorrerebbe, a un secondo al secondo? Una risposta plausibile – che però non toglie tutte le perplessità – è che in realtà le cose non avvengono o divengono, ma *sono* nello spazio-tempo. Siamo piuttosto noi (con la nostra coscienza) a scorrere lungo le nostre *linee di universo* e a vedere modificare il paesaggio circostante (inteso come realtà fisica). In altre parole, ciò che noi percepiamo come scorrere del tempo non sarebbe altro che un fenomeno meramente psicologico, di natura cioè completamente soggettiva.

In realtà, la fisica ha provveduto a fornirci una grandezza attraverso la quale definire incontrovertibilmente il verso dello scorrere del tempo anche per gli oggetti inanimati e non dotati di coscienza come l'essere umano. Questa grandezza, già incontrata in precedenza, si chiama entropia. Ma qui vogliamo riprenderla – anche perché è uno dei concetti fondamentali e forse più ostici della fisica classica – per affrontarla da un diverso punto di vista.

Consideriamo un'automobile lanciata a gran velocità lungo uno strada diritta. L'energia di moto (o, più precisamente, energia cinetica) che possiede le è conferita da una serie di trasformazioni chimiche che avvengono all'interno del motore. Improvvisamente un ostacolo si para davanti all'automobile: il conducente, per evitare l'urto, si troverà ad agire

energicamente sui freni in modo da interrompere la corsa del mezzo. L'incidente sarà sicuramente sventato, ma l'auto ha perso tutta la sua energia cinetica.

Dove è finita? Tutti sanno che l'energia è una grandezza fisica che si conserva, o, in altre parole, per un sistema isolato, essa si mantiene costante nel tempo. Se ci mettessimo a cercarla (ovviamente con strumenti appositi), la ritroveremmo in buona parte proprio nell'impianto frenante (dischi, ganasce, liquido ecc.) che in occasione della brusca frenata avrà aumentato la propria temperatura, cioè si sarà riscaldato. Nella frenata il conducente ha operato quella che in fisica viene chiamata *trasformazione di energia*: l'energia cinetica dell'auto si è trasformata in energia termica (o, meglio, energia interna) dei freni.

Manteniamo un po' di suspense sull'entropia e apriamo una parentesi.

Quasi tutte le leggi fisiche a noi note fino a oggi sono reversibili nel tempo, non distinguono cioè fra passato e futuro. Ciò significa che per queste leggi l'eventuale trasformazione di un certo sistema può essere tranquillamente annullata ripercorrendola a ritroso.

È importante sottolineare il "quasi", perché, per quanto se ne sa, esiste un'unica legge fisica per cui i due versi del tempo non sono assolutamente equivalenti: è il secondo principio della termodinamica. Per citare le parole dell'inglese Sir Arthur Eddington (1882-1944), un grande astronomo del secolo scorso, «…c'è una sola legge della natura – la seconda legge della termodinamica – che riconosce una distinzione fra passato e futuro». Fu proprio Eddington a coniare la felice locuzione *freccia del tempo*, proprio riferendosi a questa particolare legge. Ma di questo riparleremo fra breve.

Torniamo al nostro spaventato conducente d'auto che si chiede come riguadagnare l'energia cinetica persa nella frenata. In base alle considerazioni precedenti, se non fosse a conoscenza del secondo principio della termodinamica (ma tutti, inconsapevolmente, ci imbattiamo in esso diverse volte al giorno), potrebbe supporre di percorrere a ritroso la trasformazione avvenuta, cioè di raffreddare nuovamente i freni dell'auto e impiegare questa energia per rimettere in moto il mezzo.

Tutti sanno, però, che nonostante i freni effettivamente si raffreddino, l’auto rimane inesorabilmente ferma a meno che non si riaccenda il motore e s’innesti la marcia. E questa è una diretta conseguenza del famigerato secondo principio.

Che cosa afferma dunque di così importante? E come si lega tutto questo all’entropia?

Ricordato in estrema sintesi, esso afferma che il contenuto di calore dei corpi, cioè la loro energia interna, può essere usato per svolgere lavoro (come definito in fisica) solo quando c’è comunque anche passaggio di calore. In pratica, non tutto il contenuto di calore di un corpo può essere trasformato in lavoro: riferendosi all’esempio, anche volendo mettere in atto la trasformazione che vuol fare il conducente, non tutto il calore dei freni potrebbe essere usato per far riacquistare energia cinetica all’auto, cioè per compiere lavoro su di essa, ma una parte di questo calore verrebbe inesorabilmente dissipata. La trasformazione opposta, viceversa, abbiamo visto che è un’operazione di estrema semplicità.

Verso il 1870 un altro grande fisico, l’austriaco Ludwig Boltzmann (che abbiamo già incontrato nel capitolo precedente) dimostrò che il secondo principio della termodinamica è una legge statistica e può essere enunciato in termini di probabilità.

Nella sua formulazione si afferma che un sistema chiuso tende sempre a trasformarsi da uno stato più ordinato a uno meno ordinato, perché lo stato meno ordinato ha maggiori probabilità di prodursi. Basti pensare a quanto è facile mettere in disordine una stanza rispetto alle difficoltà che si incontrano per ristabilirvi l’ordine.

Il secondo principio, forse sorprendentemente, dice anche questo: un sistema (una stanza, una città, il pianeta Terra…) lasciato a se stesso tende naturalmente verso stati disordinati.

Effettivamente riesce difficile immaginare che gettando a caso oggetti in una stanza questi si dispongano secondo l’ordine che vorremmo. Ecco un’altra circostanza in cui ci scontriamo con la triste evidenza dell’aumento di entropia, intesa in questo caso come misura del disordine

di un sistema.

Ma non è finita qui. L'ingegnere e matematico statunitense Claude Elwood Shannon (1916-2001) e altri, fondatori della teoria dell'informazione, mostrarono che il concetto di entropia poteva essere applicato anche all'informazione e alla sua trasmissione.

Espresso in termini semplici, un sistema chiuso può mantenere costante il proprio contenuto di informazione o diminuirlo, ma non potrà mai aumentarlo. Un sistema chiuso può solo dimenticare le informazioni, mai crearne di nuove. Un disco di vinile, un nastro magnetico, un libro si deteriorano, e non potranno mai più riacquistare il loro contenuto originario. Ancora una volta, inconsapevolmente, ci imbattiamo con l'inesorabilità dell'aumento di entropia, questa volta intesa come perdita del contenuto di informazione di un sistema.

La freccia del tempo

Adesso che abbiamo ricordato e ulteriormente approfondito il significato del concetto di entropia e di come esso si leghi al secondo principio della termodinamica, possiamo finalmente affrontare la questione che ci eravamo posti all'inizio del precedente paragrafo relativa alla nostra esperienza dello scorrere del tempo, dal passato al futuro.

Abbiamo visto come la termodinamica ci venga chiaramente incontro stabilendo un verso per qualunque tipo di trasformazione di un sistema chiuso: l'entropia aumenta nel tempo o, nella migliore delle ipotesi, non cambia.

A questo punto ci siamo muniti addirittura di tre modi per determinare, almeno in linea di principio, in che verso scorre il tempo in un sistema termodinamicamente isolato:

- in funzione del suo livello di entropia: il tempo scorre nel verso in cui questa aumenta;
- in funzione della probabilità del suo stato: il sistema evolve sempre verso stati più probabili;
- in funzione, infine, del suo contenuto di informazione: il tempo scorre

nel verso in cui questo diminuisce.

Questo, in ultima analisi, era il proposito di Eddington: poter determinare oggettivamente il verso dello scorrere del tempo o, come la chiamò poeticamente egli stesso, la direzione della freccia del tempo.

Sembrerebbe fatta, ma non è così semplice.

Provando infatti anche a trascurare le varie difficoltà materiali dell'impresa di misurare le grandezze di cui sopra, o meglio le loro variazioni, rimane un dubbio, nemmeno di poco conto: non è forse che per svolgere delle misurazioni in momenti diversi occorre già sapere cos'è il tempo?

Fra gli studiosi del problema dell'asimmetria del tempo, l'ipotesi più accreditata vede nel passaggio del tempo una nostra consapevolezza cosciente dell'aumento di entropia cosmica.

In effetti, se consideriamo l'universo nel suo insieme, non possiamo non ritenerlo un sistema termodinamicamente isolato per cui valgano le stesse considerazioni svolte in precedenza, da cui ne discende che l'entropia dell'Universo, via via che questo si evolve, aumenta sempre.

In altre parole, l'Universo sarebbe nato da uno stato estremamente ordinato per evolversi verso stati disordinati, e perciò sempre più probabili. Che cosa dire allora delle infinite strutture ordinate presenti nell'Universo (pianeti, stelle, galassie) che si formano continuamente grazie all'azione della gravitazione?

Senza volerci addentrare nei meandri di una teoria complessa qual è la moderna cosmologia, che peraltro sul problema dell'entropia dell'Universo e della freccia del tempo mostra varie lacune, occorre dire che, in generale, diminuzioni locali di entropia sono ammesse a spese dell'entropia totale. In altri termini, per tornare all'esempio della stanza, noi possiamo certamente mettere in ordine gli oggetti in essa contenuta, riducendone perciò localmente il livello di entropia, ma quest'ultima sarà globalmente aumentata, non fosse altro che per le trasformazioni di energia avvenute all'interno del nostro corpo nell'operazione di riordinamento della stanza.

Occorre fare molta attenzione alla definizione di sistema termodinamicamente chiuso: la stanza evidentemente non lo è, se noi agiamo al suo interno e non ci consideriamo facenti parte del sistema.

In ogni caso, e malgrado gli innegabili problemi, la convinzione che identifica l'aumento di entropia cosmica con le origini del nostro senso del tempo rimane forte, proprio nello spirito dei princìpi esposti per la prima volta da Eddington.

Chissà se i fisici, su questa questione osteggiati dai più, potranno davvero porre la parola *fine* oppure dovranno cedere il passo ai loro detrattori, un folto gruppo di biologi, psicologi, filosofi, sociologi che vedono nella freccia del tempo un problema legato essenzialmente alla vita e alla nostra coscienza, impossibile da relegare nell'angusto ambito della scienza delle cose inanimate.

Oppure, quando forse avremo compreso l'ancora inafferrabile rapporto che lega la nostra mente e la nostra coscienza alla materia del nostro cervello, chissà che tutti non si debbano inchinare a una diversa e ancora ignota soluzione.

Concludiamo questo paragrafo, e con esso il capitolo, sottolineando come, al termine delle nostre considerazioni di termodinamica, sia tornata alla ribalta la forza di gravitazione universale, già nella mente di Einstein quando teorizzò la relatività generale.

È questa, infatti, che governa l'evoluzione a grande scala dell'Universo, è questa che governa la formazione di stelle e galassie e i loro moti reciproci, è da questa che, in ultima analisi, dipendono le origini di ogni forma di irreversibilità termodinamica nell'Universo reale. L'Universo volge inesorabilmente verso la *morte termica* e ciò avviene proprio in virtù dell'azione della forza di gravità.

A questa sorte, indicata dai fisici, dobbiamo sottostare tutti, volenti o nolenti, filosofi, biologi e psicologi. E questa sarà, nonostante tutto, la fine del tempo, qualunque sia stata la direzione verso cui si è mossa la sua freccia.

IV
La fisica del soggiorno

Di onde sonore, elettroni e *bit*

Penso che ci sia richiesta mondiale per circa cinque computer.
THOMAS J. WATSON JR. (FRASE PRONUNCIATA NEL 1943;

Il soggiorno è la stanza dedicata allo svago e al divertimento. Ci sediamo in poltrona e con un telecomando accendiamo il nostro impianto stereo ad alta fedeltà. La nostra musica preferita inizia a uscire dalle casse acustiche, diffondendosi per tutta la stanza. E se chiudiamo gli occhi, possiamo avere benissimo l'impressione di trovarci in un teatro, ad ascoltare un concerto di musica classica, o anche in uno stadio, ad assistere all'ultima performance della nostra star preferita.

Tutto questo è possibile grazie all'applicazione di trucchi elettronici e informatici al segnale in uscita dai diffusori acustici del nostro impianto *home theatre* (essendo in Europa, preferiamo scrivere *theatre* all'inglese, piuttosto che *theater*, come scrivono gli americani; il significato comunque non cambia).

Grazie a queste particolari tecniche di riproduzione del suono, possiamo trovarci – almeno dal punto di vista acustico – al centro della scena di azione che stiamo guardando sul nostro grande televisore a schermo piatto, rendendo l'esperienza molto più realistica e coinvolgente di quanto potessimo immaginare.

Ecco dunque di che cosa parleremo in questo capitolo, dedicato alla fisica del soggiorno: di acustica e fisica degli strumenti musicali, ma anche di alcuni dispositivi elettronici che ormai da tempo hanno larghissima diffusione anche nelle nostre case, come gli impianti *home theatre*, grazie ai quali possiamo ascoltare musica o vedere film con una qualità di

riproduzione impensabile fino a pochi decenni fa.

Dietro questi dispositivi, tuttavia, si nasconde una grande rivoluzione: quella informatica, che ha portato i computer e l'elettronica a pervadere completamente ogni attività umana, da quella produttiva a quella ludica. Un'occasione, quindi, per raccontare in breve i fondamenti dell'elettronica e dell'informatica e i princìpi di base dei computer (che ritroveremo anche nel prossimo capitolo, parlando di reti di computer e telematica).

Musica, maestro!

Chiunque abbia assistito almeno una volta a un concerto di musica classica avrà udito partire, pochi istanti prima dell'inizio, il suono di un violino seguito a ruota da tutti gli altri, intonati sulla stessa nota: è il primo violino che dà il "la", appunto, agli altri strumenti dell'orchestra perché questi possano verificare la propria accordatura. Per il pubblico, questo è un momento sempre molto suggestivo (a esso seguono alcuni secondi di silenzio e l'ingresso del direttore), ma per i musicisti è estremamente delicato: un piccolo errore e il proprio strumento verrà notato da tutti… perché *stonato*.

Ma che cosa significa "accordare uno strumento"? Lo dice la parola stessa: mettere in accordo, fare in modo che le note del proprio siano intonate con quelle degli altri strumenti.

Il *la* del clarinetto, del trombone o della chitarra deve essere lo stesso *la* suonato dal violino, indipendentemente dalla specificità degli strumenti. Certo, ogni strumento, come noto, ha una voce propria, diversa da tutte le altre, che lo rende distinguibile e riconoscibile dagli altri, ma il "vocabolario" usato – le note musicali – è lo stesso per tutti gli strumenti.

La voce degli strumenti musicali prende tecnicamente il nome di *timbro*, ma si sentono spesso usare anche termini come *colore* o *qualità* di un suono. Essa è il risultato della diversa forma degli strumenti, delle tecniche impiegate per produrre il suono, del tipo di materiali usati nella loro costruzione e di altri fattori.

Dal punto di vista fisico, la voce di uno strumento è definita principalmente dalla *composizione armonica* (cioè dalla nota fondamentale e dalle armoniche superiori) del suono prodotto e, in seconda battuta, dall'*inviluppo* della forma dell'onda sonora, cioè da come l'onda sonora si sviluppa nel tempo (attacco, regime stazionario, decadimento). Per capire meglio questi concetti, vediamo come effettivamente lavorano gli strumenti musicali.

La disciplina che studia la scienza degli strumenti musicali si chiama *organologia*. Il termine deriva dal greco *organon* che significa genericamente "strumento" (anche musicale). Gli organologi classificano gli strumenti in base alla tecnica e al mezzo materiale con cui viene prodotto il suono. Per esempio, la chitarra è uno strumento a corda pizzicata: la corda – di metallo, di nylon o di altro materiale – è il mezzo materiale con cui, attraverso la tecnica del *pizzicato*, si produce il suono.

La classe degli strumenti a corda è molto ricca e variegata, perché diverse sono anche le tecniche impiegate per suonare questi strumenti: una corda, oltre che *pizzicata* come nella chitarra, nell'arpa e nel clavicembalo, può essere *strofinata* con un archetto come negli strumenti della famiglia del violino (viola, violoncello e contrabbasso) o, infine, *battuta* come accade nel pianoforte dove un martelletto azionato dalla pressione sul tasto va a battere su una o più corde associate che iniziano a vibrare.

In generale, più una corda è spessa e pesante, più basso è il suono prodotto. Viceversa, una corda leggera e sottile produce un suono più acuto. In una chitarra, la prima e la sesta corda lasciate vibrare liberamente producono entrambe un *mi*, ma di altezza (cioè frequenza) differente. Altri fattori importanti per il tipo di suono generato sono la lunghezza della corda e la tensione con cui questa è tirata: a parità di tutti gli altri fattori, una tensione maggiore implica un suono più acuto.

Un'altra classe è quella degli strumenti ad aria, in cui è direttamente l'aria a essere messa in vibrazione per produrre il suono. Questi, a parte l'organo (in cui è la diversa lunghezza delle canne, all'interno delle quali si hanno le colonne d'aria in movimento, a generare suoni di altezza

diversa, mentre il diametro della canna ne definisce il timbro), sono tipicamente a fiato e suddivisi ulteriormente in ottoni e legni a seconda non solo del materiale di fabbricazione, ma anche e soprattutto per la tecnica di produzione del suono.

Gli ottoni come tromba, trombone e tuba, infatti, si basano sul soffio del musicista e sulla vibrazione delle labbra poste a contrasto con un bocchino per convogliare l'aria all'interno di una serie di tubi. Questi sono dotati spesso di valvole di chiusura che, se azionate, alterano la lunghezza del percorso dell'aria e quindi l'altezza del suono prodotto, cioè servono a produrre note differenti.

Al termine della serie di tubi troviamo un padiglione (o campana) da cui fuoriesce gran parte del suono prodotto dalla colonna d'aria posta in vibrazione.

I legni come clarinetto e fagotto, invece, pur avendo bisogno anch'essi del soffio prodotto dal musicista, producono il suono grazie alla vibrazione di una sottile lamina lignea (il bambù è il materiale più usato) denominata *ancia* (alcuni legni, come l'oboe, hanno ance doppie che vibrano l'una contro l'altra). Al soffio del musicista, l'aria che passa dall'imboccatura fa oscillare rapidamente l'ancia che produce vibrazioni periodiche dell'aria di passaggio, tradotte poi dallo strumento in note di varia tonalità e timbro. In genere, anche i legni sono dotati di un sistema di valvole e pistoni necessari a modificare il cammino dell'aria al loro interno.

Una curiosa eccezione nella classificazione dei fiati fra legni e ottoni è rappresentata dal sassofono che, pur essendo fabbricato in ottone, fa parte della famiglia dei legni essendo uno strumento ad ancia semplice.

La classificazione degli strumenti musicali si conclude con le percussioni: tamburi, piatti, campane e così via producono il suono, generalmente composto da un solo tono molto complesso armonicamente (spesso alterabile nella durata) quando vengono semplicemente colpiti – percossi, appunto – direttamente da una mano o, per esempio, da una bacchetta di legno, di metallo o d'altro materiale.

Un piatto percosso con una bacchetta di legno produce solamente un

certo suono caratteristico derivante dal tipo di materiale impiegato nella fabbricazione (tipicamente ottone), dalla tecnica di fusione, dal profilo della forma: ma questo stesso piatto, colpito con un oggetto diverso – una mazza con testa in feltro, per esempio – produce un suono diverso, come pure le sue oscillazioni possono venire smorzate o addirittura interrotte bruscamente.

Questo stesso ragionamento può essere ripetuto per tutti i tipi di strumenti a percussione dove membrane tese o superfici di varia forma e dimensione sono chiamate a vibrare e a far vibrare con loro gli strati d'aria a esse adiacenti. In generale, però (a parte il timpano da orchestra, uno strumento a suono determinato, cioè capace di eseguire note precise il cui suono può essere leggermente modulato tramite un pedale che agisce sulla tensione della pelle), ogni percussione produce un solo tono e per avere più toni diversi occorrono più strumenti, magari dello stesso tipo ma di forma e dimensione diversa.

Ecco l'origine di strumenti a percussione composti come lo xilofono, in cui toni diversi vengono prodotti da blocchetti di legno di differenti dimensioni, o le campane tubolari, tubi metallici di diversa lunghezza che, percossi, generano un suono attraverso la vibrazione dell'aria che si trova al loro interno.

Le caratteristiche del suono

A questo punto dovrebbe essere chiaro che, in ogni caso, il suono che il nostro orecchio ode proviene da una serie di vibrazioni più o meno periodiche dell'aria, ovvero del mezzo materiale in cui siamo immersi.

È importante sottolineare come non sia possibile udire alcun suono in assenza di un mezzo che lo trasporti (nello spazio vuoto un'esplosione è totalmente muta: ecco dove molti film di fantascienza, a parte *2001: Odissea nello spazio*, sbagliano clamorosamente!).

Il suono infatti si propaga come un'onda di pressione, ovvero con l'alternarsi periodico di compressioni e depressioni del mezzo di trasmissione longitudinalmente alla direzione di propagazione (le onde del

mare, invece, sono trasversali: l'oscillazione è in direzione alto-basso, la propagazione è orizzontale, cioè in direzione perpendicolare all'oscillazione). Nell'aria il suono si propaga grazie ai continui urti fra le molecole che la costituiscono, spinte a comprimersi o a decomprimersi dalle oscillazioni dello strumento che genera il suono stesso.

Con meccanismi simili, il suono si propaga anche negli altri mezzi ma con velocità diverse: a temperatura ambiente (20 °C), nell'aria il suono viaggia a 343 m/s, nell'acqua si propaga a 1484 m/s e nel ferro a 5100 m/s. Ecco il motivo per cui i pellerossa appoggiavano l'orecchio ai binari per sentire in anticipo l'arrivo del treno!

La voce umana

Come si fa a riconoscere la voce di una persona? A permetterci di distinguere una voce femminile da una maschile, o una voce squillante da una roca, sono le frequenze formanti, cioè quelle frequenze che compongono la voce e che costituiscono quello che si chiama lo spettro armonico tipico di ciascun suono di vocale. In particolare, è la pronuncia delle vocali che caratterizza una voce rispetto a un'altra. Il flusso d'aria che esce sotto pressione dai polmoni attraversa la laringe in cui si trovano le corde vocali. Secondo i segnali inviati dal cervello, esse possono entrare in vibrazione: così modulano il flusso d'aria secondo uno spettro di frequenze unico, determinato anche dalla geometria del tratto vocale – laringe, faringe, cavità boccale e nasale – che ha la funzione specifica di cassa di risonanza. Sono tutte queste condizioni a definire le frequenze formanti della voce: le onde sonore s'irradiano nell'ambiente attraverso la bocca e – in modo parziale e discontinuo – il naso.

Le frequenze formanti possono essere alterate anche volontariamente modificando le posizioni della mascella, della lingua o delle labbra o, addirittura, agendo sulla rigidità del palato, cioè sul grado di tonicità della muscolatura del velo palatino. In altre parole, le corde vocali generano l'onda portante che definisce l'altezza del suono, determinata – appunto – dalla loro frequenza di vibrazione; il tratto vocale, invece, produce l'onda modulante che agisce sulla qualità, cioè sul timbro sonoro della voce.

Fisiologia dell'orecchio umano

L'orecchio umano, l'organo dell'udito e dell'equilibrio, è suddiviso in tre

parti principali:

- l'*orecchio esterno*, che comprende il padiglione auricolare e il condotto (o meato) uditivo e che termina con la membrana flessibile del timpano;
- l'*orecchio medio*, alloggiato in una cavità dell'osso temporale che comunica con la faringe, costituito da una serie di 3 ossicini adiacenti (martello, incudine e staffa) che, con i loro movimenti, trasmettono le vibrazioni del timpano alla finestra ovale della chiocciola;
- l'*orecchio interno*, composto dalla chiocciola o coclea e dal labirinto. Mentre quest'ultimo è predisposto al controllo dell'equilibrio, la chiocciola (un tubo arrotolato su se stesso pieno di liquido) trasforma le vibrazioni che riceve sulla finestra ovale dai 3 ossicini in impulsi nervosi che vengono inviati al cervello attraverso il nervo acustico.

Le onde sonore entrano nell'orecchio e arrivano al timpano che entra in vibrazione a causa delle variazioni di pressione dell'aria. Il moto del timpano si trasmette ai tre ossicini che stimolano la finestra ovale: poiché questa ha una superficie minore di quella del timpano (3 mm2 contro 75 mm2), a parità di pressione la forza oscillante viene concentrata e le onde sonore si amplificano fino a 30 volte, mettendo in moto i fluidi interni alla chiocciola. Qui le vibrazioni si trasmettono alla membrana basale sotto la quale si trova l'organo del Corti formato da numerosissime cellule ciliate in grado di trasformare i movimenti meccanici in segnali elettrici che inviano al cervello.

Questo organo di senso funziona entro limiti precisi: anche se si restringe con l'età e varia da individuo a individuo, l'intervallo dei suoni udibili, detto "gamma dell'udibile", varia da 20 Hz a 20.000 Hz; al di sotto di questo intervallo si trovano gli *infrasuoni*, al di sopra gli *ultrasuoni*.

In generale, poi, riusciamo a distinguere 3 caratteristiche di un suono:

- l'*intensità*, che ne rappresenta l'energia, ossia il *volume* del suono;
- la *frequenza*, o *altezza*, che definisce la *tonalità* del suono;
- il *timbro*, ovvero la sua composizione spettrale in termini di armoniche superiori.

Chiariamo meglio di che cosa si tratta.

Al di là dell'intensità, una nota musicale è definita dalla frequenza di oscillazione indotta nel mezzo trasmissivo dallo strumento che la produce: il *la* centrale, scelto come nota di riferimento standard a livello internazionale, ha una frequenza di 440 Hz, essendo lo hertz l'unità di misura della frequenza corrispondente a una oscillazione al secondo. Ma lo stesso *la* prodotto da un violino non è identico al *la* di un flauto: i due strumenti hanno voci diverse.

Il motivo è legato al fatto che, oltre all'oscillazione fondamentale (tonica), ciascuno strumento produce una serie più o meno estesa di oscillazioni a frequenze multiple di questa (le *armoniche superiori*): sono queste oscillazioni armoniche, sempre presenti e diverse per ogni strumento, a caratterizzare il timbro o colore sonoro. Così, il suono di un violino è diverso da quello del flauto perché il suo *la* centrale – e tutte le altre note, ovviamente – è caratterizzato da un insieme di armoniche specifico e ben distinto da quello del flauto. In pratica, come già viene fatto per le onde luminose, è possibile osservare anche lo spettro delle onde sonore prodotte da uno strumento musicale: ciascuna nota di ciascuno strumento ha una composizione armonica unica.

Ma non basta, perché per ogni strumento l'evoluzione temporale dell'onda sonora di una specifica nota è diversa: in pratica il suono aumenta più o meno rapidamente, arriva a una fase stazionaria (la nota vera e propria) e infine decade fino ad annullarsi con un tempo caratteristico.

La curva che definisce questa evoluzione si chiama *inviluppo della forma d'onda* ed è anche questa diversa per ciascun strumento. Ecco il motivo per cui i risultati degli innumerevoli sforzi volti a ricostruire artificialmente i suoni naturali sintetizzandoli elettronicamente in varia maniera sono ancora lontani dall'ottenere i risultati sperati.

Ciò non toglie che al giorno d'oggi esistano sintetizzatori, analogici ma soprattutto digitali, in grado di riprodurre suoni davvero molto simili a quelli degli strumenti musicali… ma il suono di un violino Stradivari resterà sempre unico e inimitabile.

Sintetizzatori e campionatori

I sintetizzatori analogici (in gergo *synth*) furono inventati principalmente per creare suoni non esistenti in natura, mentre i campionatori (in inglese *sampler*) sono più adatti a imitare suoni acustici esistenti. Oggi, però, i campionatori integrano funzioni di sintetizzatori (come filtri e inviluppi) e i sintetizzatori usano forme d'onda campionate, quindi questa differenza netta non c'è più.

In linea di principio, comunque, il sintetizzatore produce un suono in maniera artificiale con tecniche di vario genere, mentre il campionatore registra i suoni, li digitalizza e permette di risuonarli accordati sulla tastiera. Ma la differenza è diventata più concettuale che tecnica.

I sintetizzatori analogici non esistono praticamente più (se non nel mercato dell'usato) e quelli digitali/campionatori si sono per lo più evoluti in software per computer. Alcune simulazioni si avvicinano molto all'originale, ma anche l'orecchio dell'ascoltatore si è evoluto di conseguenza, riuscendo così a percepire le diverse sfumature. La differenza sostanziale tra strumento reale e sintetizzatore è l'*espressione*, cioè quell'insieme di dinamica, interpretazione, tempo e fraseggio tipica degli strumenti acustici, impossibile da riprodurre, con le sue infinite sfumature, per mezzo di un software e una tastiera. Anche per questo il suono di un violino Stradivari resterà sempre unico e inimitabile.

DALL'ANALOGICO AL DIGITALE

Un'onda sonora varia nel tempo con continuità, propagandosi senza alcun salto apparente.

Questo è un fatto che si osserva in qualunque grandezza fisica macroscopica: dalle variazioni di pressione dell'aria al passaggio di un'onda sonora alle variazioni di velocità di un'auto che accelera da 0 km/h a 100 km/h passando via via per tutte le velocità intermedie.

Quando registriamo un suono, possiamo convertire le variazioni di altezza che compie nel tempo in analoghe variazioni di un'altra grandezza

fisica, come per esempio quelle di una corrente elettrica. Questo tipo di conversione, dove da una grandezza di tipo continuo si passa a un'altra grandezza di tipo continuo, viene detta *analogica*, proprio perché le variazioni dell'una sono *analoghe* alle variazioni dell'altra. Per questo motivo, i segnali (elettrici o di altro tipo) che variano con continuità nel tempo sono detti *segnali analogici*.

Per esempio, un orologio a lancette segna il tempo con continuità. Tutte le lancette, anche quelle che ruotano più rapidamente, come quelle dei secondi, spazzano sempre tutto il quadrante senza alcun salto (questo è vero anche se la lancetta si muove a scatti: in ogni caso, infatti, per passare da una tacca a quella successiva, deve spazzare anche lo spazio che le separa). Gli orologi a lancette sono chiamati anche *orologi analogici*, per distinguerli da quelli *digitali*, cioè a quadrante numerico, dove il tempo è scandito dai numeri che indicano le ore, i minuti e talvolta i secondi. In questi orologi, il passaggio da un secondo al successivo, o da un minuto al successivo, è indicato semplicemente da un cambio di cifra: non avviene con continuità, bensì con un salto discreto. D'altra parte, è l'etimologia del termine *digitale* a indicare il suo significato: deriva infatti dall'inglese *digit* che significa numero, parola che a sua volta deriva dal latino *digitus*, ovvero dito: è con le dita che s'impara a contare. Così, digitale è di fatto sinonimo di numerico. Ma è anche diventato contrario di analogico.

Fino a pochi decenni fa, registrare e archiviare suoni (ma anche filmati) avveniva in modalità analogica, per esempio sui nastri magnetici (le famose audiocassette e videocassette). Questi supporti, però, erano soggetti a usura e, con il tempo, l'informazione che contenevano si deteriorava fino a perdersi completamente.

Nacque così l'idea di registrare l'audio in modalità digitale, ovvero convertendolo in una sequenza di numeri, facilmente archiviabile (come file sul disco rigido del computer, su CD, su DVD ecc.) e, soprattutto, riproducibile sempre uguale a se stessa. Avendo la sequenza di numeri e conoscendo la tecnica di codifica del segnale, infatti, chiunque è in grado di riprodurre l'audio in maniera esattamente identica alla registrazione

originale definitiva, detta *master* (da cui viene poi ricavato lo stampo per effettuare le copie commerciali).

Per il trattamento, la memorizzazione ma anche la trasmissione di suoni e di immagini anche in movimento (come avviene ancora oggi nelle normali radio e televisioni analogiche) si è passati con il tempo dall'uso di tecniche analogiche all'impiego di tecniche di digitalizzazione del segnale audio e video, basate appunto sulla sua conversione in sequenze numeriche.

In estrema sintesi, quindi, il campionamento audio digitale – o, più semplicemente, *digitalizzazione* – è un procedimento di trasformazione di un'onda sonora in una serie di numeri che contiene tutte le informazioni necessarie a riprodurla successivamente.

Questo procedimento richiede che l'onda sonora sia analizzata non con continuità ma a intervalli regolari di tempo, ovvero con una certa frequenza nota appunto come *frequenza di campionamento*.

Questo è il motivo per cui l'operazione si chiama campionamento: in pratica, infatti, non si prende in considerazione l'intera forma d'onda continua, ma solo un suo campione costituito da un insieme finito di elementi che, per quanto grande, è sempre dato dal prodotto della frequenza di campionamento (che è il numero di campioni presi in un secondo) per il tempo in secondi della durata del campionamento.

Per fare un'analogia, è un po' quello che avviene nel cinema dove una sequenza filmata, in realtà, è composta da un certo numero di fotogrammi separati: i fotogrammi sono i campioni della registrazione video di un'azione originale che, però, si svolgeva in maniera continua e non frammentata (o a scatti) come risulta invece andandola a vedere fotogramma per fotogramma.

Naturalmente, maggiore è il numero di fotogrammi nell'unità di tempo, migliore è la qualità della registrazione e, di conseguenza, più fedele sarà la riproduzione rispetto all'originale. è il concetto che sta dietro la riproduzione di una grandezza campionata.

Il teorema del campionamento

Maggiore è il numero di campioni audio digitali di una certa onda, più fedele sarà la sua ricostruzione successiva. Tuttavia, non c'è bisogno di esagerare. Esiste infatti un teorema – noto con il nome di *teorema del campionamento* – che stabilisce che se vogliamo riprodurre esattamente la forma d'onda originale (evitando distorsioni in fase di riproduzione) è sufficiente registrarla con una frequenza di campionamento pari al doppio della frequenza massima dell'onda stessa.

Detto in parole semplici, per poter ricostruire interamente e con precisione un certo fenomeno, la velocità con cui occorre analizzarlo deve essere strettamente correlata alla velocità con cui questo fenomeno cambia nel tempo. Naturalmente, più rapida è la variazione di una grandezza, maggiore dovrà essere il numero di campioni da prendere.

Ma il teorema del campionamento ci dice che se vogliamo essere sicuri di poter ricostruire fedelmente il fenomeno osservato, non c'è bisogno di esagerare con la digitalizzazione, perché è sufficiente campionarlo a una velocità doppia di quella massima di variazione del fenomeno stesso. Ciò significa, in concreto, che se vogliamo campionare un'onda sonora udibile con una frequenza massima di 20 kHz, occorre lavorare a una frequenza di campionamento di almeno 40 kHz. Questo è proprio quanto avviene nella digitalizzazione della musica riprodotta dai CD audio, per registrare i quali viene impiegata una frequenza di campionamento di 44 kHz (nella pratica, infatti, è necessario campionare con una frequenza leggermente più alta rispetto a quella minima teorica).

Il teorema del campionamento ci dice qual è la frequenza a cui dobbiamo campionare un fenomeno se vogliamo riprodurlo fedelmente. In realtà, però, noi possiamo campionare anche a frequenza più bassa. In questo caso dobbiamo avere la consapevolezza che la qualità della riproduzione sarà tanto peggiore quanto maggiore è la differenza fra la frequenza di campionamento impiegata e il suo valore ottimale. Una frequenza di campionamento più bassa, perciò, può essere utile per alcuni scopi (diversi dalla riproduzione in alta fedeltà di una sorgente sonora): valori tipici dei

campionamenti a bassa fedeltà sono di 22 kHz o anche di 11 kHz che, a fronte di una perdita di qualità della riproduzione, hanno il vantaggio di dimezzare o di ridurre di 1/4 le dimensioni della sequenza numerica. Per capire bene il concetto di campionamento, molto importante nella tecnologia moderna, facciamo un esempio ingenuo ed estremamente semplificato. Consideriamo una lampada che lampeggia una volta al secondo e proviamo a prendere campioni di questo segnale luminoso semplicemente aprendo e chiudendo gli occhi a intervalli regolari. È chiaro che se campioniamo il segnale aprendoli una volta al secondo ci capiterà di vedere la lampada sempre accesa o sempre spenta, e penseremo che questa, in realtà, non lampeggia. Se però apriamo gli occhi 2 volte al secondo, vedremo chiaramente la lampada una volta accesa e una volta spenta, e saremo in grado di ricostruire perfettamente il fenomeno. Con il campionamento digitale, i suoni vengono rappresentati in forma numerica come *sequenze di bit* (contrazione dell'inglese *binary digit*, cifra binaria), ovvero di unità elementari d'informazione tipicamente associate a variazioni definite del segnale elettrico.

In informatica, il *bit* corrisponde ai numeri 0 e 1, associati agli stati logici *no* e *sì* (o *falso* e *vero*) che, in ultima analisi, corrispondono rispettivamente agli stati fisici di un circuito elettrico: 0 se il circuito è aperto (spento) e quindi non lascia passare corrente; 1 se il circuito è chiuso (acceso) e quindi permette il passaggio di corrente.

Sembra impossibile, ma il funzionamento dei circuiti elettrici di tutte le apparecchiature elettroniche moderne – dai computer ai televisori, dagli impianti stereo alle lavatrici, alle lavastoviglie ecc. – è basato proprio su questi due stati elementari (la rappresentazione di informazioni più complesse richiede l'uso di un insieme più o meno ampio di *bit*). Così, con un'opportuna sequenza di 0 e 1 – che può essere anche lunghissima – è possibile codificare i segnali audio e quelli video, ottenendo così l'audio e il video digitale. Naturalmente, per ricostruire l'onda sonora (ma ragionamenti analoghi si possono fare anche per le immagini e i segnali video), occorre che il singolo campione contenga delle informazioni

specifiche: in particolare, l'altezza dell'onda nell'istante in cui è stata campionata. Perché sia possibile convertirla in un codice numerico, la scala delle altezze è suddivisa in tanti segmenti distinti, tutti della stessa ampiezza.

Dal continuo al discreto

In un campionamento, l'altezza dell'onda non prende valori continui, ma viene approssimata per eccesso o per difetto al valore discreto più vicino. Il numero di segmenti che definisce le dimensioni – o la profondità – del campionamento, rappresenta la risoluzione in altezza con cui è condotto il campionamento. Maggiore è il numero di segmenti (più fitta è la scala), migliore sarà la rappresentazione finale dell'onda. Questo perché, con un numero più grande di gradini, le approssimazioni necessarie a rendere discreto il segnale continuo sono sicuramente inferiori.

La differenza fra il valore reale e quello discreto che si ottiene dal processo di conversione di un segnale analogico in segnale digitale prende il nome di *errore di quantizzazione*. Risoluzioni tipiche dei campionamenti audio di bassa qualità sono a 8 *bit* (corrispondenti a una suddivisione dell'altezza del segnale in 256 intervalli), mentre per le registrazioni di qualità elevata sono a 16 *bit* (corrispondenti a 65.536 intervalli).

Un altro modo di esprimere il concetto è il seguente. Quando si misura un segnale in ingresso, esso viene memorizzato come un numero rappresentato da una parola binaria, cioè da una sequenza di 0 e 1. La *risoluzione*, o profondità di *bit*, indica proprio quanto è lunga la sequenza usata per descrivere ciascun campione del segnale: maggiore è la lunghezza di questa sequenza, più ampio è l'intervallo di numeri che possono essere impiegati per misurare il campione.

Ciò implica misure più accurate e riproduzioni fedeli del segnale. Ora, se una sequenza di 8 *bit* permette di rappresentare numeri compresi fra 0 e 256, e una parola binaria lunga 16 *bit* arriva fino 65.536, cioò significa che, in un campionamento a 16 *bit*, ciascun campione può assumere un valore compreso fra 0 e 65.536.

Facciamo un esempio. Prendiamo un segnale che può variare con continuità assumendo valori che vanno da 0 a 10.

Se noi scegliamo una scala con una risoluzione di 10 intervalli, è chiaro che tutte le volte che il segnale avrà valori differenti da un numero intero sarà approssimato all'intero più vicino. Così, nella digitalizzazione, un segnale con valore 8,2 prenderà valore 8, proprio come un segnale con valore 7,7, mentre un segnale con valore 5,9 sarà approssimato a 6, proprio come un segnale di valore 6,4.

Se invece scegliamo una risoluzione di 100 intervalli, avremo una precisione al decimo della scala, e tutti i valori indicati nell'esempio non subiranno alcuna approssimazione (non verranno distorti).

Meglio, ma abbiamo moltiplicato per 10 le dimensioni della sequenza numerica da archiviare… Inoltre, ovviamente, i segnali con valori al centesimo come 5,43 o 7,91 continueranno a essere approssimati (rispettivamente a 5,4 e a 7,9.)

In ultima analisi, la qualità di un suono digitale dipende da 2 fattori: la frequenza di campionamento usata e la risoluzione scelta per suddividere il segnale in altezza.

Ora, poiché gli errori di quantizzazione sono più facilmente percepibili dall'orecchio umano rispetto a quelli dovuti a una bassa frequenza di campionamento (in genere gli errori di quantizzazione provocano un fruscio facilmente percepibile come rumore di fondo), nel caso si debbano limitare le dimensioni del *file* che deriva dalla digitalizzazione è preferibile scegliere un'alta risoluzione, riducendo eventualmente la frequenza di campionamento.

Se invece siamo limitati nella risoluzione, cerchiamo di aumentare al massimo la frequenza di campionamento così da circoscrivere il più possibile l'effetto degli errori di quantizzazione.

All'aumento della qualità del campionamento, dunque aumentano anche le dimensioni dei file. E fin qui non abbiamo tenuto conto del fatto che, in genere, nelle riproduzioni ad alta fedeltà, il suono è stereo, ovvero a 2 canali (destro e sinistro).

Così, il prezzo degli effetti stereofonici è il raddoppiamento delle dimensioni del *file*. Per fare un esempio, lo spazio di archiviazione di 1 min di audio in qualità CD (cioè con risoluzione a 16 *bit* e 44 kHz di frequenza di campionamento) è di 10 *megabyte* (Mb): circa 10 milioni di *byte*, dove 1 *byte* (contrazione dei termini inglesi *binary term* = termine binario, unità di misura della capacità di archiviazione delle memorie informatiche) è una sequenza ordinata di 8 *bit*. Se invece il minuto di musica è registrato a 22 kHz con una risoluzione di 8 *bit*, serve uno spazio di archiviazione di circa 1,25 Mb. E se il suono è stereo, queste dimensioni vanno raddoppiate.

Negli ultimi anni, gli informatici si sono dedicati a cercare di risolvere il problema dell'occupazione di memoria dei *file* audio (e di quelli grafici e video) individuando alcune tecniche di riduzione delle dimensioni chiamate *algoritmi di compressione*. In pratica, il segnale numerico viene trattato in modo da non abbassare eccessivamente la qualità audio – così che l'orecchio continui a sentire suoni non troppo distorti – riducendone però le dimensioni. Pur essendo l'audio molto difficile da comprimere, sono stati individuati comunque alcuni algoritmi di compressione in grado di ridurre le dimensioni del *file* di un fattore 10, senza registrare grosse perdite di qualità.

Fra questi, il formato audio compresso più famoso è senz'altro l'*mp3* che deriva dall'applicazione di un algoritmo che riesce a comprimere il suono mantenendo una qualità audio molto fedele all'originale, sia pure a prezzo di una certa perdita di dati.

In pratica, per ridurre le dimensioni del *file* e, di conseguenza, risparmiare spazio di archiviazione, il codificatore *mp3* rimuove dal *file* audio alcuni suoni. Il trucco per mantenere alta la qualità consiste nell'eliminare quei suoni che gli studi di psicoacustica – la disciplina che si occupa della percezione soggettiva del suono – dicono che non possono comunque essere rilevati dall'orecchio umano.

In genere, tuttavia, un buon ascoltatore è in grado di riconoscere la differenza fra un *file* in formato *mp3* e un CD originale.

Home theatre e acustica domestica

Abbiamo appena acquistato un impianto *home theatre* e l'abbiamo installato in salotto. Siamo ansiosi di metterlo alla prova fra le mura domestiche, dopo che le prove di ascolto nel negozio ci avevano dimostrato che quello era esattamente l'impianto che volevamo e cercavamo da tempo. Inseriamo il DVD nel lettore, alziamo il volume e… il suono che esce dai diffusori acustici è impastato, la stanza rimbomba, insomma, quella che stiamo vivendo è un'esperienza di ascolto completamente diversa da quella vissuta in negozio.

Come è possibile? La risposta a questa domanda sta nell'acustica del nostro soggiorno, ovvero nel modo in cui la stanza – e tutto il suo contenuto: poltrone, divani, tavoli, mobili – reagisce al passaggio delle onde sonore.

La qualità del suono che si diffonde nella stanza, infatti, dipende da diversi fattori: l'elettronica dell'impianto e in particolare dell'amplificatore, i cavi di collegamento fra i diversi elementi e fra l'amplificatore e i diffusori acustici, le prestazioni dei diffusori stessi. Chiaramente, non possiamo modificare l'elettronica dell'impianto, né cambiare gli altri fattori in gioco se essi dipendono dal modo in cui è stato progettato e fabbricato l'impianto che abbiamo acquistato. Tuttavia, possiamo migliorarne le prestazioni agendo almeno sulla disposizione della stanza, in particolare sulla posizione dei diffusori acustici e dei mobili che rappresentano degli ostacoli alla propagazione delle onde sonore. Queste, infatti, possono essere riflesse, rifratte, assorbite, diffratte, esattamente come accade alle onde elettromagnetiche e, in particolare, alla radiazione luminosa.

La *riflessione* consiste nel rimbalzo dell'onda su un ostacolo che la rimanda indietro secondo una direzione determinata: è il caso dell'eco.

Se l'onda incide su una superficie non piana né perfettamente levigata, non viene riflessa ma rimbalza tornando indietro in tutte le direzioni: in questo caso si parla di *diffusione* e di onda diffusa.

La *rifrazione* consiste nella deviazione della direzione di propagazione dell'onda quando essa passa da un mezzo a un altro: per esempio dall'aria all'acqua, o dall'aria al vetro. Un esempio tipico è quello del remo parzialmente immerso nell'acqua che sembra spezzato: ciò avviene proprio perché i raggi di luce, passando dall'acqua all'aria, vengono deviati.

L'*assorbimento* è la scomparsa parziale o totale dell'onda che viene catturata dagli ostacoli che incontra durante la propagazione o dal mezzo stesso in cui si propaga.

La *diffrazione* è un fenomeno tipico di ogni moto ondoso e si verifica quando un'onda incontra un ostacolo sul suo cammino: i bordi dell'ostacolo alterano il fronte d'onda (che, ad esempio, da piano può diventare sferico) variano la direzione di propagazione dell'onda. Questo fenomeno dipende dalla lunghezza d'onda e dalle dimensioni dell'ostacolo, ed è tanto più evidente quanto più queste sono confrontabili con la lunghezza dell'onda. A causa della diffrazione, un'onda può aggirare un ostacolo e propagarsi anche al di là di questo. è così che le onde sonore prodotte nel soggiorno possono arrivare, seppure attenuate, nelle altre stanze dell'appartamento: grazie a una serie di riflessioni sulle pareti interne della casa e anche grazie alla loro diffrazione, causata principalmente dal passaggio attraverso le porte che collegano fra loro le varie stanze.

Torniamo dunque al nostro *home theatre* che non suona come dovrebbe o, meglio, come vorremmo che suonasse: in fin dei conti, al di là di tutte le specifiche tecniche possibili e immaginabili, siamo noi, con i nostri gusti e le nostre orecchie, giudici insindacabili della qualità della riproduzione sonora, e il metro di giudizio è l'ascolto personale. Possiamo tentare di agire sulla collocazione dei diffusori acustici – chiamati anche *casse acustiche* o semplicemente *altoparlanti* – nella stanza, tenendo presente i diversi fattori che possono condizionarne la resa sonora: tendaggi, mobili, tappeti, forma della sala (non tutte le sale sono a pianta rettangolare!), altri eventuali ostacoli, quali poltrone, sedie, tavoli o tavolini. Tutti questi, insieme alla distanza dei diffusori acustici dalle pareti, dal pavimento e dal

soffitto, sono elementi che influenzano in maniera più o meno marcata la qualità del suono, non tanto per come viene emesso (che dipende esclusivamente dalle caratteristiche costruttive dell'impianto di riproduzione), quanto per come viene percepito dall'ascoltatore.

Primo, e ovvio, accorgimento da seguire è di non frapporre alcun ostacolo fra i diffusori e le nostre orecchie: la diffrazione che provocano sulle onde sonore ne deteriora senz'altro la qualità.

Ma occorre anche fare attenzione al gioco di assorbimenti e riflessioni: in particolare queste ultime si sovrappongono al suono originario, provocando disturbi di vario genere (rimbombi, risonanze, suoni impastati). Ecco perché gli studi di registrazione hanno pannelli fonoassorbenti applicati alle pareti. In casa, componenti fonoassorbenti particolarmente efficaci possono essere i tendaggi (meglio se estesi lungo tutta la parete) e i tappeti (da distendere proprio davanti ai diffusori principali) che sono da raccomandare proprio per la loro grande capacità di assorbire i suoni e di evitare riflessioni spurie da parte del pavimento.

Ma come disporre le casse?

Andiamo ora alla disposizione vera e propria dei diffusori acustici. Innanzi tutto, occorre che i due diffusori principali (che possono essere anche gli unici dell'impianto) compongano un triangolo equilatero con la nostra testa di ascoltatori. Inoltre è opportuno che questi siano collocati all'altezza delle nostre orecchie. Quindi può essere utile acquistare insieme all'impianto anche un paio di supporti ad altezza regolabile o, eventualmente, due staffe da agganciare alle pareti, in modo che i diffusori si trovino all'altezza giusta dal suolo. Questo permette anche di isolare i diffusori dal suolo, evitando così che il pavimento produca risonanze indesiderate. Per questo stesso motivo, è bene disporre i diffusori a una certa distanza dalle pareti (di almeno mezzo metro) e in particolare dal muro retrostante.

I diffusori acustici, il cui scopo finale è quello di riconvertire in analogico il suono letto dai supporti digitali come il CD o il DVD e

decodificato dall'impianto, non sono in grado di riprodurre qualunque frequenza sonora. A seconda delle caratteristiche costruttive, infatti, è possibile trovare diffusori per alte frequenze (detti *tweeter*), per frequenze intermedie (detti *midrange*) e per frequenze basse (detti *woofer*). Spesso i vari tipi sono raccolti in un'unica cassa che, quindi, prende il nome di diffusore a 3 vie o a 2 vie (se raccoglie solo *tweeter* e *midrange*).

In effetti, spesso si preferisce dedicare alle frequenze molto basse – sotto i 200 Hz – un particolare diffusore detto *subwoofer*, che può anche essere amplificato a parte per aumentarne la potenza. A causa della loro elevata lunghezza d'onda, le onde a bassa frequenza non sono direzionali, nel senso che le nostre orecchie non sono in grado di determinarne la direzione di provenienza, ma vengono percepite piuttosto come sensazioni fisiche a causa degli spostamenti d'aria prodotti dalle variazioni di pressione indotte dal diffusore.

Maggiore è la potenza del *subwoofer*, più alto è il grado di coinvolgimento fisico dell'ascoltatore che, grazie a questo particolare diffusore, può "ascoltare con tutto il corpo" e non solo con le orecchie.

Per queste sue caratteristiche, il *subwoofer* può essere messo ovunque, anche nascosto dietro al divano. Ma se vogliamo regolare al meglio l'intensità dei suoni bassi (*bass*, in inglese, mentre gli alti si dicono *treble*), lo possiamo mettere a ridosso di una parete nuda: quanto più è vicino ad essa, tanto maggiore è l'effetto di risonanza della parete con i suoni bassi che porta a un'amplificazione di questo intervallo di frequenze.

Gli effetti stereofonici e quelli eventuali di *surround* ("circondare" in inglese), invece, sono riprodotti dalle normali casse, o dai cosiddetti *satelliti*, diffusori di piccole dimensioni da collocare, anch'essi, in maniera opportuna. In particolare, in un impianto *home theatre* del tipo 5.1, ovvero con 5 diffusori di frequenze medio-alte e un *subwoofer*, i 2 diffusori principali stanno davanti all'ascoltatore (in modo da formare con esso i vertici di un triangolo equilatero), quello centrale sta esattamente di fronte all'ascoltatore e i 2 posteriori vanno collocati ai lati dell'ascoltatore, ma in posizione arretrata.

Grazie a questa disposizione, gli sfasamenti dei segnali nei diversi canali audio – uno per ciascun diffusore – vengono esaltati, dandoci l'impressione di trovarci nel mezzo dell'azione o del concerto.

è evidente che, a patto di non avere ostacoli fra noi e le sorgenti del suono, a influenzare in particolar modo le onde sonore sono le riflessioni successive all'emissione, note come *riverberi*.

Grandezze fondamentali dei riverberi sono:

- l'*intensità dell'onda riflessa* che dipende da quanta parte dell'onda viene assorbita dall'ostacolo;
- i *tempi di ritorno* o *tempi di riverberazione*, ovvero il ritardo con cui arrivano al nostro orecchio rispetto al suono diretto, che dipendono ovviamente dalla velocità del suono nell'aria (che, a sua volta, dipende dalla temperatura).

Conoscere questi dati è fondamentale per progettare e costruire sale da concerto, teatri o stanze per conferenze. Infatti, se in una sala per concerti di musica classica un certo riverbero può essere auspicato per dare più potenza e maggiore volume ai suoni percepiti, questo è invece completamente da eliminare nel caso in cui lo strumento da ascoltare sia la voce umana, come in una conferenza: i riverberi contribuirebbero solo a produrre un rimbombo, impastando le sillabe, con il rischio di renderle incomprensibili.

Per ridurre i riverberi, quindi, è necessario impiegare materiali che siano in grado di assorbire al massimo i suoni.

In ultima analisi, il riverbero di una sala acustica dipende da questi fattori: dimensioni e forma dell'ambiente, composizione delle pareti investite dal suono. Materiali diversi, infatti, hanno coefficienti di assorbimento diversi. Inoltre, le riflessioni su pareti di tipo diverso hanno intensità diverse a frequenze diverse. Tipicamente, si osserva che i suoni ad alta frequenza sono assorbiti più facilmente di quelli a bassa frequenza. Un caso particolare di riflessione delle onde sonore è l'eco, il fenomeno per cui i suoni emessi dall'ascoltatore (che in questo caso funge anche da sorgente sonora) vengono riflessi da un ostacolo e arrivano nuovamente

all'ascoltatore poco mutati in intensità, ma con un certo ritardo rispetto al suono diretto.

In particolare, l'eco si distingue dal riverbero perché le singole riflessioni dell'onda sonora sono percepite distintamente dall'ascoltatore. Perché questo accada, occorre che il ritardo fra il suono diretto e quello riflesso sia superiore al decimo di secondo. Sotto questo valore l'orecchio umano non è in grado di percepire 2 suoni come distinti (*fenomeno della persistenza*) e si ha il riverbero.

Con queste premesse, è facilissimo calcolare qual è la distanza minima di un ostacolo perché possa produrre un'eco. Poiché la velocità del suono nell'aria è di circa 340 m/s (alla temperatura di 20 °C), in un decimo di secondo il suono percorre 34 m. Se la sorgente del suono e l'ascoltatore coincidono o si trovano comunque nello stesso punto di fronte all'ostacolo, il tragitto di andata è uguale a quello di ritorno: è sufficiente che l'ostacolo disti almeno 17 m perché si possa ascoltare un'eco. Per distanze inferiori abbiamo solo riverberi.

Anche l'occhio vuole la sua parte!

Fin qui abbiamo parlato di suoni, ma un impianto *home theatre* è sempre accompagnato da un televisore: ragione per cui adesso passiamo a parlare degli apparecchi televisivi che, assieme alle radio, sono stati i primi dispositivi elettronici a entrare nelle nostre case.

Fino a non molti anni fa, la tecnologia più diffusa per questo apparecchio era quella a tubo catodico (o CRT, acronimo dall'espressione inglese *cathode ray tube*), molto ingombrante ma estremamente efficace e duraturo.

Il tubo catodico è un cannone elettronico, un dispositivo che spara elettroni (chiamati anche *raggi catodici*) che vengono accelerati da un elevato campo elettrico e opportunamente deviati lungo il loro cammino da un campo magnetico variabile, in modo da essere focalizzati a formare l'immagine sullo schermo, composto da tanti piccoli elementi di materiale

fluorescente (i *fosfòri*: attenzione all'accento!). Eccitati dagli urti con gli elettroni, i fosfòri emettono luce, che noi riconosciamo come immagine.

Gli elettroni sono prodotti per effetto termoionico da una placca di metallo che si riscalda facendo passare una corrente elettrica al suo interno. A causa dell'aumento di temperatura, alcuni elettroni acquistano un'energia sufficiente per scappare dal reticolo cristallino, portando così al processo di emissione.

Il tubo catodico viene costruito in modo che al suo interno vi sia un vuoto molto spinto, così che gli elettroni possano arrivare a destinazione sullo schermo senza incontrare altri atomi o molecole lungo il percorso.

Da qualche tempo, però, si stanno facendo strada altre tecnologie come quelle a cristalli liquidi (LCD da *Liquid Crystal Display*, schermo a cristalli liquidi, una tecnologia molto usata anche nella produzione di schermi di orologi, calcolatrici tascabili e telefoni cellulari) e al plasma, molto meno ingombranti, che richiedono consumi energetici inferiori e, fattore non indifferente, che hanno costi di produzione in continua discesa.

Nel caso dei televisori LCD, l'immagine viene formata appunto dagli elementi a cristalli liquidi che variano le loro proprietà ottiche a seconda del campo elettrico in cui si vengono a trovare. Così, secondo la proprietà ottica del momento, il cristallo liquido fa passare o no la luce proveniente dal *pannello di retroilluminazione* che si trova dietro lo schermo LCD e che funge da sorgente di luce bianca.

Completamente diversa è la modalità di costruzione dell'immagine nei televisori al plasma, costituiti da tante piccole celle all'interno delle quali è posta una miscela di gas nobili.

Sempre grazie all'applicazione di un campo elettrico, i gas contenuti nelle celle si trasformano in *plasma*, ovvero in un gas completamente ionizzato, composto da elettroni di carica elettrica negativa, e da ioni (atomi elettricamente carichi) di carica elettrica positiva ai quali gli elettroni sono riusciti a sfuggire.

A seconda dell'intensità del campo elettrico e, quindi, della corrente che attraversa il plasma, questo diventa più o meno eccitato ed emette più o

meno luce: un atomo o una molecola si dicono eccitati quando acquistano energia (per esempio urtando un altro atomo o assorbendo radiazione elettromagnetica). In generale, dopo un po' il sistema decade dallo stato eccitato – spontaneamente o perché influenzato da fattori esterni – e torna allo stato di partenza, emettendo (sempre sotto forma di radiazione elettromagnetica) la stessa quantità di energia che aveva accumulato nel processo di eccitazione.

In pratica, il principio di funzionamento su cui si basa uno schermo al plasma è lo stesso che fa funzionare una lampada al neon: il gas nobile al suo interno viene eccitato da una scarica elettrica ed emette radiazione visibile.

La persistenza della visione

Come già accade per il senso dell'udito, anche la sensazione visiva ha una sua persistenza nell'occhio umano. Lo stimolo dovuto alla luce che giunge alla retina dell'occhio e che viene interpretato dal cervello come "immagine", infatti, "occupa" i sensori della retina anche dopo che l'immagine non è più presente nel campo visivo. L'immagine che si forma sulla retina viene sostituita dall'immagine successiva solo dopo una frazione di secondo, rimanendo una sensazione visiva per un breve ma significativo intervallo di tempo prima di essere sostituita. La cinematografia si basa proprio su questo processo fisiologico: grazie alla persistenza delle immagini sulla retina, infatti, per avere la percezione del movimento è sufficiente guardare una sequenza di immagini fisse (i singoli fotogrammi della pellicola) in successione sufficientemente rapida.

Nel cinema – ma anche nei cartoni animati – il numero di fotogrammi (*frame*, in inglese) al secondo è pari a 24. Un numero non altissimo, ma più che sufficiente per dare continuità alle immagini in movimento proiettate sullo schermo.

Una frequenza inferiore a 24 fotogrammi al secondo (abbreviato in fps, dall'inglese *frames per second*) porta a vedere una sequenza a scatti più o meno evidenti, secondo la velocità con cui si svolge la scena. Così, il

cinema si basa su un’illusione ottica. Anche la televisione, però.

Le immagini che vediamo sullo schermo televisivo non si trasformano con continuità, così come avviene in una scena reale, ma si formano proprio sotto i nostri occhi, senza che noi ce ne possiamo accorgere. Infatti, i singoli elementi luminosi che compongono lo schermo, detti *pixel* (contrazione dell’inglese *picture element*, elemento dell’immagine), sono disposti in righe che non si accendono tutte insieme, ma una alla volta, in sequenza rapidissima.

In particolare, lo standard televisivo più diffuso a livello europeo (PAL, da *Phase Alternating Line*) prevede che le schermate siano composte da 625 linee, trasmesse 25 volte al secondo. Così, i *pixel* si accendono uno dopo l’altro, riga per riga, 25 volte al secondo, dandoci l’impressione che le schermate si succedano una dopo l’altra senza soluzione di continuità. Ma è solo un’illusione.

In realtà la questione è leggermente più complicata. La scansione delle linee non è fatta in sequenza, ma accendendo prima le linee dispari e poi quelle pari. Lo schermo si può considerare perciò diviso in 2 parti, dette “semiquadri”, composte rispettivamente dalle linee pari e da quelle dispari.

Un televisore che opera con lo standard PAL, visualizza 50 semiquadri al secondo, 25 pari e 25 dispari, facendo sì che un quadro completo venga tracciato – appunto – 25 volte al secondo.

Questo sistema di scansione a linee alternate è chiamato *interlacciato*. Ma esiste anche il sistema di scansione in cui le linee vengono composte una dopo l’altra: questo sistema, detto *progressivo*, è particolarmente usato nei monitor di computer e nei moderni televisori LCD e al plasma. Sia l’uno che l’altro metodo di scansione offrono vantaggi e svantaggi e, al momento, convivono entrambi sul mercato, anche se il *progressive scan* è favorito rispetto all’*interlaced scan* nella produzione di televisori ad alta definizione.

Il singolo *pixel* – fosfòro del CRT, elemento a cristalli liquidi, cella di plasma – può essere di varie dimensioni e forme, ma tipicamente è quadrato o rettangolare: se avvicinate lo sguardo al monitor del vostro

computer o allo schermo del vostro televisore, scoprirete che è davvero scomposto in una miriade di piccoli quadrati o rettangoli.

Ma c'è di più. Nei televisori e nei monitor a colori, ogni *pixel* è a sua volta composto da 3 *subpixel*, ciascuno per ogni colore fondamentale: rosso, verde e blu. Tutti i colori che vediamo sullo schermo, infatti, sono il risultato della composizione di questi 3 colori fondamentali, ottenuta accendendo in maniera opportuna i vari *subpixel* e facendo in modo che abbiamo la corretta intensità luminosa.

Pixel, pixel e ancora pixel

Naturalmente, maggiore è il numero di *pixel* in cui è diviso lo schermo, migliore sarà la qualità dell'immagine che apparirà più nitida.

La quantità di *pixel* di uno schermo televisivo o di un monitor per computer è comunemente chiamata *risoluzione*. Quindi, più alta è la risoluzione dello schermo, più definita è l'immagine proiettata.

Il ragionamento è analogo a quello fatto per il campionamento dei suoni, considerando il *pixel* come un singolo campione dell'immagine che vogliamo visualizzare. Così, un'immagine codificata con il sistema PAL è composta – se digitalizzata – da un numero di *pixel* orizzontali di 768, che moltiplicati per 576 righe (quelle effettivamente impiegate per il segnale video, rispetto alle 625 tracciate sullo schermo) danno un totale di poco più di 400.000 *pixel*.

Per confronto, nei televisori ad alta definizione del tipo *HD ready* (ovvero adatti all'alta definizione; HD sta appunto per *High Definition*), ogni riga contiene 1.280 pixel e sono presenti 720 righe per un totale di oltre 900.000 *pixel*, più del doppio di quelli dello standard PAL, ma comunque meno della metà rispetto a quelli contenuti nello schermo di un televisore *Full HD*, completamente compatibile con tutti i formati dell'alta definizione, che ha 1.920 *pixel* per riga e ben 1.080 righe: un totale di oltre 2 milioni di *pixel*.

Per inciso, notiamo che il formato standard PAL ha un rapporto larghezza su altezza del tipo 4:3 (che si legge *quattro terzi*), mentre gli

standard attuali, come quelli HD, prediligono il formato cosiddetto *widescreen* (“schermo ampio” in inglese) che ha un rapporto di 16:9 (che si legge *sedici noni*) fra larghezza e altezza.

In altre parole, a parità di altezza dello schermo, i televisori del tipo *widescreen* sono più larghi. Gli schermi del tipo 16:9, oltre a replicare più da vicino la tipologia di visione dell’occhio umano (che ha un campo visivo molto più ampio in orizzontale che in verticale), permettono anche una maggiore compatibilità con i diversi formati delle immagini cinematografiche, riducendo in maniera drastica l’ampiezza delle bande nere superiore e inferiore che sono presenti nella trasmissione televisiva dei formati cinematografici.

È evidente che, a parità di dimensioni dell’immagine riprodotta, un maggiore numero di *pixel* garantisce una migliore risoluzione e quindi un livello più alto di dettaglio, perché ciascun *pixel* rappresenta un’area più piccola.

Questo è il motivo per cui, anche in ambito fotografico, si cerca di produrre fotocamere digitali aventi sensori con un numero di *pixel* sempre più alto. Così, siamo partiti dai formati da alcune centinaia di migliaia di *pixel*, per arrivare al giorno d’oggi con macchine fotografiche da oltre 10 *megapixel* (1 *megapixel* equivale a 1 milione di *pixel*).

Anche nel caso della digitalizzazione video, ciascun campione, cioè ciascun *pixel*, deve contenere le informazioni necessarie a riprodurre l’immagine, ovvero il colore che gli compete. Occorre quindi scegliere una profondità in *bit* anche per digitalizzare il video, e non solo per l’audio.

Per esempio, un’immagine in bianco e nero dove ciascun *pixel* può assumere solo il colore bianco o il colore nero, ha la profondità di un *bit*: se questo vale 1, il *pixel* è nero, se viceversa vale 0, il *pixel* è bianco. Un’immagine a 8 *bit* può essere rappresentata con 256 toni diversi di grigio (ovvero a 256 sfumature diverse per passare dal bianco al nero), oppure con una tavolozza di 256 colori differenti.

Le profondità elevate più impiegate sono quelle a 24 *bit*, corrispondenti a oltre 16 milioni di colori, e a 32 *bit*, corrispondenti a oltre 4 miliardi di

colori.

Chiaramente, più alti sono il numero di *pixel* dell'immagine e la loro profondità in *bit*, maggiore è la dimensione in *byte* dell'immagine che ne risulta e la conseguente occupazione di memoria di archiviazione. Per ovviare a questo inconveniente, anche per immagini e filmati sono stati ideati degli algoritmi di compressione in grado di ridurre le dimensioni del *file* finale con una perdita più o meno limitata della qualità dell'immagine o del video nella riproduzione.

Uno dei formati compressi più usati per le immagini statiche, come per esempio è una fotografia, è quello denominato *jpeg* che ha l'equivalente video, adatto alle immagini in movimento dei filmati, nel formato *mpeg*.

In genere, gli algoritmi di compressione si basano sull'analisi di *pixel* contigui, e portano all'eliminazione dei *pixel* meno percettibili dall'occhio umano. In particolare, i nostri occhi sono meno sensibili alle variazioni di colore che alle piccole variazioni di luminosità così che, nel caso in cui nell'immagine vi siano 2 *pixel* vicini con una minima variazione cromatica, l'algoritmo di compressione ne elimina uno. Viceversa, nel caso in cui fra 2 *pixel* contigui vi sia una minima variazione di luminosità, essi vengono entrambi conservati.

In realtà, il grado di compressione *jpeg* viene deciso dall'utente: più alto è il livello di compressione desiderato, più viene degradata l'immagine. Il risultato della compressione in formato *jpeg* – che porta a una perdita di informazioni – è un'immagine con un livello di dettaglio inferiore rispetto a quella di partenza, ma con una dimensione in *byte* che può arrivare a essere alcune decine di volte più bassa dell'originale.

Calcolatore o elaboratore?

Fin qui abbiamo parlato di *bit* e di *byte* praticamente senza mai citare il vero "signore dei *bit*": il computer.

Ormai presente quasi in ogni casa e in ogni luogo di lavoro, il computer è diventato un vero e proprio compagno di viaggio delle nostre vite e per

molte persone e molte attività è quasi impensabile – se non addirittura impossibile – poterne fare a meno. Eppure questo strumento, frutto del genio dell'umanità, ha cominciato a infiltrarsi nelle nostre esistenze meno di trent'anni fa. Prima di allora, infatti, i computer esistevano, certo, ma nessuno immaginava che potessero avere la diffusione che oggi conosciamo.

Nonostante l'ingresso dei computer nelle nostre case sia storia recente, le origini del computer – o per lo meno delle idee che poi hanno portato all'invenzione del computer – risalgono a qualche secolo fa.

La storia del computer comincia infatti nel 1642, lo stesso anno in cui muore Galileo, quando l'allora diciannovenne Blaise Pascal (1623-1662), più noto come filosofo che come inventore, realizza la prima macchina capace di sommare e sottrarre numeri attraverso la tecnica del *riporto automatico*. È questa la *Pascalina*, la prima calcolatrice meccanica della storia.

L'invenzione venne perfezionata da Leibniz nel 1671, che rese possibile svolgere anche le moltiplicazioni, ma entrambe non ebbero un grande successo commerciale: i tempi non erano ancora maturi.

Occorre aspettare un secolo e mezzo per sentire riparlare di calcolatori. È il professore di matematica a Cambridge Charles Babbage (1791-1871) a progettare, nel 1823, un calcolatore meccanico differenziale che doveva essere capace di svolgere operazioni fino all'ottava cifra decimale.

Babbage però abbandonò ben presto l'idea attratto da un progetto ancor più grandioso, la cosiddetta *macchina analitica*. La macchina, dotata di 5.000 ruote dentate e di 200 accumulatori di dati (i precursori delle moderne memorie volatili) doveva essere capace di svolgere un'addizione al secondo.

A differenza delle macchine precedenti, però, la macchina analitica era potenzialmente in grado di svolgere una qualunque sequenza di operazioni, era cioè *programmabile*.

Il programma veniva di volta in volta introdotto attraverso le schede perforate, idea mutuata dai telai meccanici di Jacquard. Purtroppo neanche

la macchina analitica vedrà mai la luce, bloccata da difficoltà tecniche insormontabili per quell'epoca.

L'ingegnere statistico statunitense Herman Hollerith (1860-1929) impiegato del *Bureau of the Census* in occasione del censimento americano del 1890, è il primo a realizzare la prima calcolatrice a schede perforate funzionante a elettricità. A differenza della macchina analitica di Babbage, in cui le schede dovevano contenere il programma, la *macchina tabulatrice elettrica* di Hollerith leggeva dalle schede i dati da elaborare, producendo – come risultato dell'elaborazione – una scheda.

Ed ecco che nel 1936, dopo quasi mezzo secolo dalla macchina tabulatrice di Hollerith e oltre un secolo dalle idee rivoluzionarie di Babbage, compare quello che è considerato il primo computer elettromeccanico moderno: lo Z-1, come venne chiamato dal suo inventore, l'ingegnere tedesco Konrad Zuse (1910-1995), è un calcolatore a relè (cioè a interruttori comandati da un segnale elettrico) in grado di lavorare solo su 2 numeri (lo 0 e l'1), a combinazioni dei quali si può far corrispondere qualsiasi grandezza da elaborare. Finalmente i due filoni del calcolo – quello filosofico concettuale del linguaggio binario sviluppato dal matematico inglese George Boole (1815-1864) sulla scia delle idee di Leibniz, e quello elettromeccanico a schede perforate – si uniscono. In seguito Zuse, allora appena ventiseienne, realizzò altri e più perfezionati modelli programmabili, occupando con i suoi calcolatori il salotto della casa dei genitori a Berlino. Curiosamente, le macchine di Zuse non riceveranno grande attenzione dal mondo scientifico tedesco: per gli ingegneri del Reich, il solitario scienziato costruiva una macchina di "dubbia utilità"!

Consigliato dal collega Helmut Schreyer (1912-1984), Zuse sarà a un passo dall'inventare l'elaboratore elettronico, nel quale non esistono più parti meccaniche in movimento, ma solo circuiti elettrici: purtroppo per lui, l'idea datagli da Schreyer di sostituire i relè con valvole elettroniche non gli parve tale da essere presa in seria considerazione.

Indipendentemente da Zuse, anche se con 8 anni di ritardo, il fisico

americano Howard Aiken (1900-1973), in collaborazione con l'IBM, realizza all'Università di Harvard il Mark 1, il primo calcolatore aritmetico universale.

È il coronamento del sogno visionario di Babbage reso possibile dagli studi svolti da Alan Turing (1912-1954), un altro illustre matematico inglese che aveva dimostrato la possibilità teorica di costruire macchine che eseguissero qualsiasi sequenza di operazioni purché opportunamente programmate. Il Mark 1 poteva sommare 2 numeri di 23 cifre in soli 6 secondi.

L'ENIAC, il "padre" di tutti i computer

I tempi però erano ormai maturi: nel febbraio del 1946, infatti, vede la luce il computer.

Un gruppo di ricercatori americani, guidati dall'ingegnere John Eckert (1919-1995) e dal fisico John Mauchly (1907-1980) per conto del laboratorio di ricerche balistiche dell'esercito, realizza l'ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Calculator*) mettendo in pratica ciò che Schreyer aveva consigliato a Zuse 10 anni prima.

Con l'ENIAC nasce anche il termine *bit*, coniato da John Tukey (1915-2000), uno dei partecipanti al progetto.

Di dimensioni impressionanti (18.000 valvole, 30.000 kg di peso, 180 m2 di superficie occupata), poteva svolgee ben 300 moltiplicazioni al secondo (invece di una al secondo come nel modello elettromeccanico di Aiken). Eckert richiese il brevetto dell'ENIAC il 26 giugno dello stesso anno, ma lo otterrà solo il 4 febbraio 1964, 18 anni più tardi.

Nel dicembre del 1946, all'Istituto di Studi Avanzati dell'Università di Princeton, inizia anche la costruzione dell'EDVAC (*Electronic Discrete Variable Automatic Computer*), da considerare il primo elaboratore moderno perché fa uso di programmi memorizzati. In questo computer, infatti, le istruzioni per eseguire i calcoli non vengono introdotte per mezzo di schede perforate, ma direttamente registrate in forma numerica in una memoria interna: solo così, durante l'elaborazione, la macchina può

saltare direttamente da un'istruzione alla successiva.

Il "calcolatore", perciò, diventa "elaboratore", capace di trattare non solo operazioni aritmetiche, ma qualsiasi tipo d'informazione purché espressa in codice binario. Il progetto, diretto dal grandissimo matematico John Von Neumann (1903-1957) noto per i suoi studi di scienza dei calcolatori, si concluse 6 anni dopo, nel 1952, quando l'EDVAC entrò finalmente in funzione. Nel frattempo, il 14 giugno 1951, la *Remington Rand* (poi *Sperry Rand*, dal 1955) che aveva acquisito anche la società fondata da Eckert e Mauchly, consegna all'ufficio censimenti del governo statunitense il primo computer prodotto in serie: l'UNIVAC 1 segna la nascita dell'industria informatica.

Da questo momento in poi, lo sviluppo tecnologico darà un costante impulso alla produzione di calcolatori sempre più sofisticati, cioè capaci di operazioni sempre più complesse, e di componenti elettroniche sempre più miniaturizzate.

Nel 1972 viene messa in vendita la prima calcolatrice tascabile dotata della stessa capacità di calcolo dei computer di 10 anni prima. A commercializzarla sarà la famosa società *Hewlett-Packard*, nel 1938, fondata in un garage di Palo Alto in California dagli inventori William Hewlett (1913-2001) e David Packard (1912-1996): il suo nome era HP-35.

Anche la nascita del computer vede entrare in campo la giustizia, come già era accaduto per il brevetto del telefono, nella disputa fra il nostro Antonio Meucci (1808-1889) e lo scozzese Alexander Graham Bell (1847-1922). Il 19 ottobre 1973, con una sentenza tanto importante quanto poco nota, un giudice della corte distrettuale di Minneapolis dichiara nullo il brevetto dell'ENIAC depositato da Eckert e Mauchly nel 1946, e riconosce la paternità dell'invenzione a John Vincent Atanasoff (1903-1995), fisico americano di origine bulgara che, fra il 1939 e il 1942, aveva realizzato un modello di elaboratore elettronico in grado di operare su cifre binarie, battezzandolo ABC (*Atanasoff Berry Computer*).

A far riemergere dall'oblio il nome di Atanasoff fu una causa intentata

nel 1967 dalla *Honeywell* nei confronti della *Sperry Rand*, proprietaria del brevetto dell'ENIAC: la *Honeywell* ne sosteneva la nullità. Nel processo venne alla luce che l'ENIAC era basato sui princìpi dell'ABC, rivelati dallo stesso Atanasoff a Eckert e Mauchly all'inizio degli anni Quaranta. Con quella sentenza che, a differenza di quella relativa alla disputa fra Meucci e Bell, sanciva la corretta attribuzione della paternità dell'invenzione, Atanasoff divenne il primo vero inventore dell'elaboratore elettronico: e quasi nessuno ne conosce il nome!

Dalle memorie magnetiche e dalle valvole termoioniche siamo passati ai transistor e ai circuiti integrati, dalle schede perforate siamo giunti ai CD e ai DVD: tutto questo è avvenuto in pochissimi decenni. I personal computer presenti nelle nostre case erano impensabili alla fine della seconda guerra mondiale.

L'integrazione a grande e grandissima scala ha fatto sì che un microprocessore Intel Core 2 Duo di ultima generazione contenga, in meno di 150 mm2, quasi 300 milioni di transistor, 1.000 volte di più dell'ormai "preistorico" 386!

E anche il numero di operazioni al secondo compiuto da un elaboratore è aumentato vertiginosamente: il primo supercomputer Cray 1, realizzato nel 1976 (anno in cui, tra l'altro, venne commercializzato il mitico Apple II, il primo *personal computer* di grande successo), era in grado di compiere 180 milioni di operazioni al secondo, una velocità di calcolo di oltre 5 milioni di volte inferiore ai più veloci supercomputer attuali, capaci di 1 milione di miliardi di operazioni al secondo.

Che differenza rispetto al Mark 1, capace di sommare 2 numeri di 23 cifre in 6 secondi: e accadeva meno di settant'anni fa!

L'intelligenza dei computer

Lo sviluppo dei computer non si limitò ad aumentarne le capacità di calcolo e di elaborazione o a diminuirne le dimensioni, ma dette impulso anche ad altre discipline. Fra tutte la cibernetica, le cui applicazioni nel

mondo contemporaneo sono diffusissime e ormai irrinunciabili.

Padre riconosciuto della cibernetica fu Norbert Wiener (1894-1964) che, nel 1946, coniò questo termine per indicare una nuova scienza. Essa doveva studiare tutti quei sistemi che, per funzionare, hanno bisogno di un *feedback* (vedi *supra*, p. 55) cioè di ricevere continuamente informazioni dall'ambiente esterno.

Un classico esempio di sistema con complessi *feedback* (che in italiano vuol dire "retroazione" o "effetto di ritorno") è il nostro sistema nervoso, in perenne scambio d'informazioni con il mondo che ci circonda.

Obiettivo della cibernetica, quindi, è quello di analizzare i parallelismi fra macchine, animali e uomini e cercare le regole, i procedimenti, i trattamenti a cui sono sottoposte le informazioni per raggiungere il controllo sull'ambiente circostante.

Per capire meglio che cosa significhi "parallelismo tra macchine e uomini", facciamo riferimento proprio alla definizione che Wiener dette di macchina. Per lo scienziato, infatti, una "macchina" è, in termini cibernetici, un qualunque "apparecchio per convertire messaggi di ingresso in messaggi di uscita". Quindi non solo meccanismi, motori o altri marchingegni meccanici, ma oggetti capaci di interagire attivamente con l'ambiente.

Valutare organismi e macchine tramite i soli parametri di ingresso (eventi esterni che modificano l'oggetto) e di uscita (cambiamenti prodotti dall'oggetto nell'ambiente), senza occuparsi di come effettivamente la macchina sia strutturata o di quali proprietà abbia, significa concentrare la propria attenzione sul comportamento della macchina, cioè proprio sulle modificazioni controllabili dall'esterno.

E c'è chi pensa che l'aver posto l'accento sugli aspetti comportamentali delle macchine, concezione propria della cibernetica, abbia molte implicazioni sulle ideologie dominanti della nostra contemporaneità, sulle quali ha influito probabilmente una visione dell'uomo come "macchina guidata dall'esterno" (*feedback* uomo-ambiente dominato dall'ambiente), in contrapposizione a quella, più antica, dell'uomo guidato dall'interno,

cioè dalle sue qualità intrinseche, dalla sua interiorità. L'*uomo nuovo* si contraddistingue perciò per la propria capacità di raccogliere, trattare, analizzare le informazioni di cui ha bisogno per vivere: da qui l'importanza attribuita attualmente al concetto di comunicazione. L'uomo è fondamentalmente un elaboratore d'informazioni.

Questa premessa è cruciale per affrontare il tema del prossimo paragrafo: se e come possiamo considerare "intelligenti" le macchine.

Il test di Turing

Il primo ad accostare il termine *intelligenza* a quello di *macchine* fu Alan Turing, scienziato tanto geniale quanto sfortunato.

Dapprima onorato e glorificato per i suoi servigi offerti all'Inghilterra durante la seconda guerra mondiale (riuscì a violare il famoso *Enigma*, il codice segreto di trasmissione tedesco), morì suicida – ingerendo una mela avvelenata! – nel 1954, a soli 42 anni, dopo essere stato processato per atti osceni in quanto omosessuale. Personaggio eccentrico (si narrano di lui episodi coloriti, come il fatto che indossasse la giacca del pigiama al posto della camicia, o che allucchettasse la tazza del tè al termosifone, o che amasse giocare a tennis vestito solo di un impermeabile), è considerato unani memente il profeta dell'Intelligenza Artificiale per aver pubblicato nel 1950 un articolo intitolato *Computing Machinery and Intelligence*.

Qui cercava di definire in modo univoco le condizioni per cui si poteva definire "intelligente" una macchina. La soluzione che adottò, divenuta poi nota come *test di Turing*, glissava sul problema principale, cioè sulla definizione di intelligenza, fondandosi invece sull'osservazione e l'analisi dei comportamenti.

Il test di Turing consiste nel mettere in contatto un interlocutore umano con un altro interlocutore – che può essere un uomo o una macchina – per mezzo di un terminale. Se, in base alle risposte fornite, l'uomo non riesce a capire se il secondo interlocutore è umano o è una macchina, allora significa che se il secondo interlocutore è una macchina, si tratta di un macchina con un comportamento intelligente. In altre parole, una

macchina (che altro non è se non un elaboratore elettronico) può definirsi intelligente se riesce a imitare, cioè *simulare*, i comportamenti umani.

Il primo programma che affrontò brillantemente il test di Turing (senza però superarlo, ovviamente!), dimostrando la possibilità per i computer di simulare capacità di ragionamento tipiche dell'uomo e dando così il via alle moderne ricerche sull'Intelligenza Artificiale (o più brevemente IA, termine coniato nel 1956), fu *ELIZA*, un programma scritto da Joseph Weizenbaum (1923-2008) allora docente di *Computer Science* al *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) di Boston.

ELIZA era un programma di analisi del linguaggio progettato per recitare la parte di uno psicoterapeuta impegnato in un colloquio con un paziente. Il codice, per la verità piuttosto rudimentale, riconosceva determinate parole chiave e ricomponeva domande a partire dagli *input* ricevuti dagli interlocutori: pur lavorando in modo meccanico, i colloqui che ne risultavano parevano sensati.

Il successo di *ELIZA* fu superiore a ogni aspettativa, tanto che numerosi psicologi ne fecero richiesta in modo da attrezzare gli ospedali di computer-psicoterapeuti, alleggerendo così il proprio carico di lavoro. A partire da questo risultato, Weizenbaum cominciò a manifestare pubblicamente le sue preoccupazioni per le aspettative che una certa opinione pubblica nutriva nei confronti degli elaboratori elettronici, macchine che, per quanto intelligenti, non erano in ogni caso capaci di capire.

Weizenbaum fu un convinto assertore del rischio che poteva essere generato dal fatto di non imporre alcuna limitazione alle capacità di prendere decisioni dei computer, e si riferiva in particolar modo alle applicazioni militari di una certa tecnologia, ma le sue valutazioni si adattavano anche alle applicazioni in campi quali la politica, la giustizia e la psicologia.

Come è evidente dal mondo in cui viviamo, la sua, come quella di altri, è rimasta una voce nel deserto.

Reti neurali, sistemi esperti, robot

Oggigiorno, per chi si occupa dell'IA e delle sue applicazioni, il test di Turing è preistoria. Sistemi esperti, reti neurali, computer paralleli, sono alcuni termini ormai d'uso comune fra gli operatori informatici, ma pochi, oltre a loro, sanno veramente di che cosa si tratta.

Cerchiamo dunque di riassumerne brevemente il significato, inserendo la descrizione nel contesto più ampio delle moderne ricerche sull'IA. La nascita dell'IA come disciplina scientifica viene fatta risalire all'anno in cui fu pubblicato il famoso articolo di Turing, anche se l'espressione IA viene usata per la prima volta da Marvin Minsky (nato nel 1927) e John McCarthy (anche lui nato nel 1927) 6 anni dopo, in uno storico convegno.

Il desiderio di riprodurre in una macchina i comportamenti umani e, quindi, anche il pensiero, si perde nella notte dei tempi. Ancor prima di essere realizzati veramente, automi meccanici e robot pensanti fanno la loro comparsa nella letteratura, fino a giungere a romanzi e film di fantascienza come *2001: Odissea nello spazio*, in cui l'elaboratore elettronico HAL 9000 manifesta capacità di ragionamento e di pensiero completamente umanizzate.

L'IA è, per la verità, una scienza con obiettivi più limitati, fondata sulla concretezza e sulla pragmaticità del risultato. La definizione che possiamo dare di IA, infatti, è quella di "branca della scienza dei calcolatori che si pone l'obiettivo di realizzare sistemi capaci di esibire comportamenti sensati che, se esibiti da un uomo, verrebbero ritenuti intelligenti". Anche in questa definizione è fondamentale l'aspetto di interazione fra ambiente e macchina, fra segnali in ingresso (*input*) e quelli in uscita (*output*), risultati da elaborazioni più o meno complesse attraverso una serie di regole chiamate *algoritmi* che possono tenere conto dell'eventuale presenza di errori e quindi indicare, fra varie soluzioni approssimate, quella più sensata.

Sistemi intelligenti sono, per esempio, quelli capaci di tradurre una lingua in un'altra (sia pure con varie limitazioni), oppure di teleguidare robot (anch'essi intelligenti) in ambienti ostili e pericolosi per l'uomo in

modo da effettuare analisi o riparazioni. Sono macchine che vedono, sentono, comprendono e parlano, ma esclusivamente nell'ambito del compito che devono svolgere. In sintesi, sono strumenti di ausilio all'uomo in alcuni tipi di lavoro intellettuale, proprio come le macchine utensili lo sono per il lavoro manuale.

Realizzare macchine di questo tipo non è cosa semplice, e gli studi sull'IA attingono a quelli dei neuroscienziati sul funzionamento – ben più complesso! – del nostro cervello, giungendo così a un approccio multidisciplinare che sta cominciando a dare i suoi frutti.

Per esempio, in quei sistemi noti come *Reti Neurali Artificiali* (RNA) che, come le *Reti Neurali Biologiche* (RNB) e come il cervello, il principio di elaborazione, le regole e le risposte si fondano sulle connessioni fra individui e sulla loro reciproca interazione: neuroni in quelle naturali, neurodi in quelle artificiali.

Chiaramente siamo ancora ben lontani dalla realizzazione di una RNA che si avvicini al comportamento di una RNB che ha un numero di individui e di connessioni molto superiore, capace di elaborazioni e pensieri che forse mai saranno alla portata delle macchine (per esempio, avere coscienza di se stesse).

Diversi dalle reti neurali che hanno capacità di apprendimento e abilità operative aperte, sono i *sistemi esperti*, anch'essi programmi per computer molto complessi ma con un ambito di applicazione più ristretto. In particolare, mentre una RNA è capace d'inferire le proprie regole da esempi applicativi, un sistema esperto ha bisogno a priori delle regole specifiche al campo di applicazione per poter funzionare correttamente.

Altra differenza fondamentale è quella relativa alle procedure di elaborazione: mentre i sistemi esperti operano sequenzialmente, cioè svolgendo una singola operazione per volta (come i normali computer sequenziali, appunto), le RNA lavorano in parallelo, compiendo molte operazioni contemporaneamente, proprio grazie all'elevato numero di connessioni che operano contemporaneamente.

Un sistema esperto, quindi, è un programma potentissimo ma incapace di

un ragionamento flessibile e adattabile, cosa di cui sono capaci, invece, le RNA.

Anche i computer paralleli basano la loro elevata velocità di calcolo sulla presenza di più processori che lavorano contemporaneamente, a differenza dei computer usuali che hanno un singolo processore che deve svolgere tutte le operazioni.

Chiudiamo con i robot, parola che richiama alla mente immagini di esseri metallici con lucine lampeggianti di forma vagamente antropomorfa.

Coniata da Karel Čapek (1890-1938) nel 1921 – il termine ceco significa letteralmente *schiavo* – per indicare proprio gli automi meccanici all'opera sotto gli ordini di uomini, fu portata in auge dai romanzi fantascientifici di Isaac Asimov (1920-1992) nei quali i robot sottostavano a ferree leggi di comportamento al fine di non danneggiare la razza umana che li aveva costruiti.

Per la verità, è raro che i robot in funzione oggigiorno assomiglino a quelli mostrati nei film di fantascienza: sono piuttosto bracci meccanici snodati che si trovano lungo le catene di montaggio delle fabbriche, dove saldano, verniciano, montano e ispezionano. Altri robot (o *automi*) sono stati inviati in ambienti ostili come lo spazio o le profondità oceaniche per esplorare luoghi a noi altrimenti inaccessibili. Ma chissà, forse un giorno nemmeno troppo lontano avremo davvero a che fare con un robot umanoide che ci aiuterà in casa o sul lavoro: e allora veramente le *leggi sui robot* di Asimov faranno la loro comparsa nelle legislazioni!

Domotica, ovvero la casa intelligente

I computer sembrano adesso in grado di svolgere qualunque compito venga loro assegnato, anche il più complesso.

Riescono a vincere a scacchi contro i campioni del mondo, smistano i bagagli negli aeroporti, gestiscono il traffico delle telecomunicazioni, controllano il volo delle sonde spaziali, verificano il funzionamento delle centrali nucleari, prevedono il tempo meteorologico e l'andamento dei mercati finanziari… Già oggi le nostre vite sembrano completamente

condizionate e spesso dipendenti da questi strumenti. Ma in un futuro non molto lontano i computer, intesi qui in senso lato come dispositivi di elaborazione, saranno ancora più presenti nelle nostre case.

È quanto si aspettano che accada gli esperti di *domotica* (contrazione del latino *domus*, casa, e *automatica*), la disciplina che studia le tecnologie necessarie ad automatizzare le funzioni di una casa grazie all'uso dei computer.

Con opportuni timer, sensori – di temperatura, di illuminazione, di umidità, di fumo, di posizione, di movimento ecc. – e attuatori disposti opportunamente nell'ambiente, è possibile controllare in maniera automatica, ovvero senza l'intervento dell'uomo, la climatizzazione della casa, il suo grado d'illuminazione, gli impianti di sicurezza, l'apertura e la chiusura di porte e finestre, ma anche gestire, per esempio, l'accensione degli elettrodomestici ad alto consumo (come il forno e la lavatrice) in momenti determinati della giornata, evitando i sovraccarichi di corrente che, sganciando l'interruttore limitatore sulla linea di fornitura dell'energia elettrica, potrebbero causare fastidiosi *black-out*.

In una *casa intelligente*, come viene chiamata una casa che integri queste funzioni, non c'è più bisogno di ricordarsi di spegnere le luci uscendo da una stanza, di accendere lo scaldabagno prima di uscire per andare a lavoro o di aspettare un quarto d'ora prima che il forno raggiunga la temperatura desiderata: provvede lei a tutto, nei tempi e nei modi più opportuni. Oppure, grazie all'espansione e all'evoluzione delle tecnologie telematiche, possiamo sempre farlo noi da remoto, ovvero dall'ufficio, dalla palestra o dal negozio in cui stiamo facendo la spesa.

I vantaggi?

Eccoli, solo per citare i più immediati: risparmio energetico, miglioramento della qualità della vita, maggiore sicurezza, aumento del comfort, semplificazione della gestione della casa e riduzione dei relativi costi.

E se a qualcuno tutto questo non piacesse, be', può sempre decidere di non servirsene (basta disattivare l'impianto) o, più semplicemente, non

installare alcun impianto di automazione!

Una finestra sul microcosmo

Parlando delle differenze fra i concetti di analogico e digitale abbiamo detto che a livello macroscopico tutti i fenomeni sembrano svolgersi con continuità, senza salti, né improvvise inversioni: una grandezza passa da un valore a un altro toccando sempre tutti i valori intermedi. E, almeno secondo il senso comune, non potrebbe fare altrimenti.

Natura non facit saltus (la natura non fa salti) dicevano gli antichi, convinti che tutto, in natura, si svolgesse con continuità: il passaggio del tempo, un percorso nello spazio, un cambiamento di uno stato energetico di un corpo e così via.

Mai più secca smentita venne a quella professione di fede nella continuità della natura se non dai fisici che vissero i primi trent'anni del secolo scorso. Planck, Bohr, Schrödinger, Born, Heisenberg, De Broglie, Dirac – tanto per citare coloro che maggiormente hanno contribuito a questa imponente rivoluzione scientifica – hanno mostrato a tutti come il mondo dell'infinitamente piccolo sia profondamente diverso dal mondo macroscopico, aprendo così la strada a uno sconvolgimento epistemologico ancora in atto e ben lungi dal volgere al termine.

La folle idea di Planck

Era la fine del XIX secolo. I fisici sperimentali continuavano a raccogliere dati su esperimenti a cui ancora nessuno era riuscito a dare risposta: lo spettro del Sole, la struttura dell'atomo, i raggi X, la radioattività.

Max Planck (1858-1947) studiava termodinamica, e fu lì che trovò la risposta. La luce, ipotizzò in una riunione della fine dell'anno 1900 passata alla storia, viene emessa in *quanti* di radiazione, cioè per unità discrete, e non con continuità come tutti pensavano. Da allora il fisico tedesco è noto come il "padre" della fisica moderna. Quella ipotesi, infatti, risolveva

brillantemente il suo problema (si stava occupando dello spettro di emissione del cosiddetto *corpo nero*, un assorbitore ed emettitore ideale), e forniva nuove, impensate possibilità agli altri problemi che si stavano con il tempo accumulando sulle scrivanie senza soluzione.

Ma altri inquietanti quesiti erano alle porte: come conciliare le nuove scoperte e la nascente teoria con tutta la perfetta costruzione della fisica classica? Come verificare la validità di certe ipotesi? Come, infine, risolvere il problema dei fondamenti concettuali?

Nel frattempo Niels Bohr (1885-1962), danese di Copenaghen, sviluppava un modello di struttura atomica in cui gli elettroni, per passare da un'orbita a un'altra, cioè per cambiare il loro stato energetico, dovevano emettere o assorbire proprio uno di quei quanti di radiazione.

L'austriaco Erwin Schrödinger (1887-1961), prendendo le mosse dall'osservazione di alcune analogie fra il comportamento degli elettroni e quello delle onde, formalizzò in un'equazione che prende il suo nome il moto dei primi all'interno dell'atomo, fondando così la *meccanica ondulatoria*. L'equazione di Schrödinger forniva il necessario supporto teorico al modello atomico di Bohr, ma con una differenza sostanziale: in questa equazione, infatti, non si descrive propriamente il moto di una particella, ma l'evoluzione temporale di una grandezza, la cosiddetta *funzione d'onda* che contiene tutte le informazioni necessarie a rappresentare il sistema in esame (per esempio, l'atomo d'idrogeno, oppure un elettrone libero, e così via).

La funzione d'onda è una grandezza complessa che non ha analogo classico: non era facile perciò trovarne la corretta interpretazione.

Per questo venne in aiuto Max Born (1882-1970), anche lui tedesco come Planck e come molti altri fondatori della meccanica quantistica. Egli fece per la prima volta comparire in fisica il concetto di "densità di probabilità". Per Born, il modulo quadrato della funzione d'onda di una particella (cioè una funzione complessa delle variabili spazio-temporali) altro non era che la probabilità che la particella stessa si trovasse, in un determinato istante, in una certa posizione dello spazio.

In un certo senso, la funzione d'onda non ci dice dove sarà la particella dopo un certo intervallo di tempo, come invece fanno le equazioni della meccanica classica, bensì ci dice quanto sarà la probabilità che, trascorso quell'intervallo di tempo, noi la possiamo effettivamente trovare in quella posizione.

Lo sconvolgimento del punto di vista era notevole, e non fu facile far passare questa idea nella comunità dei fisici.

Fu ancora Bohr che, abbracciando senza riserve l'ipotesi probabilistica della funzione d'onda, dette, almeno in quel momento, il colpo di grazia ai deterministi convinti. Fra questi si trovava anche Einstein che, nonostante tutto, dette contributi essenziali allo sviluppo della nuova teoria. Sua è la famosa frase «Dio non gioca a dadi», data a commento di una disputa personale con Bohr, con il quale, per altro, era legato da un rapporto di affetto e di stima reciproca.

Il principio d'indeterminazione

Il più sembrava fatto, ma non era così.

Werner Heisenberg (1901-1976), giovane brillante e di belle speranze, si dedicava da tempo allo studio della struttura atomica per altra via da quella di Schrödinger: egli infatti aveva formalizzato le grandezze fisiche in esame con degli enti matematici che vanno sotto il nome di matrici (da cui il nome di *meccanica matriciale*, in contrapposizione a *meccanica ondulatoria*). I risultati che trovava erano effettivamente gli stessi di Schrödinger e degli altri; tuttavia, purtroppo per lui, le matrici su cui si trovava a svolgere i calcoli non erano particolarmente maneggevoli: erano matrici infinite.

Furono ancora Schrödinger, Born e altri a dimostrare l'assoluta equivalenza dei due formalismi, schiudendo le porte della celebrità anche al nostro Heisenberg, a un passo da mollare tutto (i fisici, ovviamente, usano il formalismo ondulatorio, più semplice e immediato, ma ciò non toglie alcun merito a Heisenberg).

Heisenberg però, peregrinando fra le matrici, una scoperta importante

l’aveva fatta, eccome. Si trattava del famigerato *principio di indeterminazione*. Per spiegarci, faremo ricorso a un esempio.

Consideriamo un pallone da calcio (qui forse i fisici ortodossi cominceranno a lanciare anatemi… ma noi proseguiamo). All’inizio della partita, il pallone viene posto al centro del campo: questa è la sua posizione iniziale. La sua velocità iniziale, ovviamente, è nulla.

Appena viene dato il calcio d’inizio, il nostro pallone comincia ad assumere posizioni diverse sul campo e velocità diverse a seconda di come viene calciato; noi potremmo, istante per istante, tracciarne la traiettoria. Il pallone, infatti, con il suo raggio di circa 20 cm e una massa di circa 400g, è un oggetto macroscopico e segue le leggi classiche della dinamica. Ciò significa che, se un giocatore chiama la palla da un compagno di squadra, quest’ultimo, piedi buoni permettendo, potrà passargliela con estrema precisione (addirittura sui piedi, se è un fuoriclasse), facendogli seguire il tragitto desiderato (rasoterra, a pallonetto e così via).

E allora? Dov’è tutta questa indeterminazione di cui vanno parlando i fisici? Da questi ragionamenti pare che non ce ne sia traccia…

Consideriamo adesso un elettrone, la particella microscopica per eccellenza, e proviamo a immaginare una partita di calcio con un elettrone che fa le veci del pallone.

Qui cominciano i problemi. Infatti, non appena noi tentassimo di localizzarlo sul campo, il nostro elettrone fuggirebbe come impazzito con una velocità tale da non farsi stoppare, oppure, viceversa, se noi decidessimo di calciarlo con una certa velocità verso la porta avversaria, lo ritroveremmo forse nella nostra rete, causando uno sfortunato autogol…

Perché dovrebbe avvenire tutto questo? Perché il principio di indeterminazione di Heisenberg stabilisce limiti teorici invalicabili alle nostre capacità di compiere misure precise su quelle che i fisici chiamano *variabili coniugate*. Fra queste variabili troviamo, appunto, la posizione e la quantità di moto della particella (cioè il prodotto della massa di un corpo per la sua velocità).

Espresso in parole semplici, ciò significa che è possibile misurare con

estrema precisione la posizione dell'elettrone oppure la sua quantità di moto, mentre l'altra grandezza rimane però completamente indeterminata.

Ecco perché la particella che noi abbiamo usato come pallone da calcio non farebbe al caso nostro, come pure nessun altro corpo microscopico: il principio d'indeterminazione impedirebbe a qualsiasi fuoriclasse di indirizzare volutamente l'elettrone verso la porta avversaria con la giusta velocità.

Ma allora, quella che noi abbiamo chiamato traiettoria (classica) del vero pallone da calcio, è definibile per una particella microscopica? La risposta, purtroppo per i fanatici del determinismo, è no.

La traiettoria di un corpo, infatti, è stabilita quando si definiscono, istante per istante, la posizione e la velocità: in base ai dettami di Heisenberg non possiamo più farlo, se diamo la posizione non possiamo dare la velocità e viceversa.

Per quello che ci è dato di sapere, i corpi microscopici non seguono vere e proprie traiettorie per giungere da una posizione a un'altra: diciamo, come ebbe a dire il grande fisico statunitense Richard Feynman (1918-1988), che percorrono uno degli infiniti cammini sempre disponibili per passare da un punto a un altro dello spazio.

Spazio e tempo, con il principio d'indeterminazione, acquistano un nuovo sapore, mai avuto fino ad ora: quello dell'incertezza. Una lapide posta all'università di Heidelberg, dove lo scopritore del principio trascorse parte della sua vita immerso nei suoi studi, afferma che, nello spirito dei suoi insegnamenti, Heisenberg *forse* è passato di là…

Onde o corpuscoli?

Ma il mondo microscopico riserva ancora nuove sorprese.

Gli scienziati già da tempo avevano osservato strani comportamenti nella materia e nella luce: in particolare le particelle, immaginate tipicamente come corpuscoli di dimensione infinitesima, si comportavano come se fossero onde, mentre la radiazione elettromagnetica, descritta formalmente dalle equazioni dell'elettromagnetismo di Maxwell come un'onda, si

trovava in determinate circostanze sperimentali ad agire come se fosse costituita da particelle, i famosi *quanti di luce*: i *fotoni*. E mai era capitato di osservare, nello stesso esperimento, entrambi gli aspetti contemporaneamente.

Louis de Broglie (1892-1987), nella sua tesi di dottorato in fisica, ipotizzò l'esistenza di un comportamento complementare sia nella luce, sia nella materia. A seconda del fenomeno fisico coinvolto, la luce poteva comportarsi come onda o come particella, e così pure la materia, ma i due diversi comportamenti – quello ondulatorio e quello corpuscolare – non si manifestavano mai insieme (*principio di complementarietà*).

De Broglie formalizzò anche questa sua ipotesi in una nota formula in cui a una particella dotata di quantità di moto (una grandezza tipicamente corpuscolare) si associa una certa lunghezza d'onda (una grandezza tipicamente ondulatoria) e, viceversa, a un'onda di radiazione si associa una particella dotata di quantità di moto.

È da quel momento che i fisici parlano tranquillamente sia di onde di materia, come l'onda elettronica dell'atomo di cui l'equazione di Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984) descrisse il moto, sia di particelle di luce.

Anche qui il colpo inferto ai concetti tradizionali di spazio e di tempo fu terribile: un corpuscolo materiale, fortemente localizzato, a volte diventa onda e si delocalizza completamente.

Bohr, che più di altri si era dedicato al problema dei fondamenti concettuali della nuova teoria, raccolse tutte queste istanze innovative ospitando ripetutamente nel suo istituto danese i vari fisici coinvolti, per compiere con loro ricerche, discutere e studiare le nuove frontiere della fisica. Fu così che si formò quella che va sotto il nome di *Scuola di Copenaghen*: un folto gruppo di fisici convinti assertori dell'interpretazione probabilistica della meccanica quantistica.

Le fondamenta su cui si basa questa visone del mondo sono: la quantizzazione delle grandezze fisiche, la funzione d'onda o, meglio, il suo modulo quadro considerato come densità di probabilità, il principio

d’indeterminazione, il principio di complementarietà e, infine, il principio di corrispondenza, che asserisce che la meccanica quantistica applicata a corpi macroscopici si riduce – “corrisponde” – alla meccanica classica.

L’enorme pasticcio dei quanti, come lo definì coloritamente qualcuno, era servito.

V
La fisica dell'appartamento

Di lampadine che si accendono, di telefoni che squillano e di finestre che sbattono

La radio non ha futuro.
WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN) NEL 1899

La fisica della nostra casa non si esaurisce con quella che abbiamo visto nelle quattro stanze esaminate fin qui. C'è ancora da scoprire quella degli impianti elettrico e telefonico. Ci sono i termosifoni e i condizionatori d'aria, il cui funzionamento è basato sui princìpi della termodinamica che abbiamo imparato a conoscere nei capitoli precedenti. Ma nella nostra casa ci possono essere anche computer in rete con connessioni *wireless* e collegati a Internet tramite la banda larga. Insomma, la nostra casa non finirebbe mai di stupirci con tutta la scienza e la tecnologia che contiene.

Ma c'è anche tanta fisica in un gioco apparentemente semplice come il biliardo. Ecco il motivo per cui, prima di parlare di elettricità o di raccontare la nascita di Internet, ci soffermiamo un po' su stecche, bilie e panni verdi.

LA FISICA DEL BILIARDO

Alcuni fortunati hanno in casa anche un tavolo da biliardo. Allora, dopo il precedente, tecnologico e quantistico, apriamo quest'ultimo capitolo tornando alla buona, vecchia meccanica classica, affrontando lo studio della fisica che sta dietro questo gioco apparentemente così semplice, fatto di traiettorie precise e determinate. D'altra parte chi non ha mai visto una partita di biliardo, anche soltanto al cinema? In effetti è difficile non

ricordare Paul Newman nello *Spaccone* o lo stesso Newman assieme a Tom Cruise nel *Colore dei soldi* pronti a scommettere gloria e soprattutto denaro su una partita al mitico tavolo verde. Ma anche in Italia, grazie alla passione del toscano Francesco Nuti, non sono mancate pellicole sull'argomento, da *Io, Chiara e lo Scuro* fino al *Signor Quindicipalle*, in cui Nuti si esibisce più volte in un colpo con il quale riesce a mandare contemporaneamente in buca tutte e quindici le palle.

Ma come può essere fisicamente possibile un colpo simile? Come riescono i maestri a far compiere alle bilie straordinarie evoluzioni?

In effetti, esistono diversi modi di giocare a biliardo: con due bilie (comunemente chiamate palle), un boccino e un certo numero di birilli, con 15 o più bilie colorate e numerate da mandare in buca con un'altra bilia, a stecca o a mano, a carambola con un tavolo privo di buche e così via, con regole e tecniche di gioco specifiche e diverse anche da paese a paese. Tuttavia, alcune cose rimangono certamente fisse: sono le leggi della fisica e in particolare della meccanica classica che, nel biliardo, trovano una loro ideale e interessantissima (oltre che divertente) applicazione.

Il campo di gioco tipico è costituito da un panno verde, generalmente di lana – ma attualmente vengono usati materiali simili di aspetto ma con caratteristiche fisiche diverse – steso su una spessa e rigidissima lastra piana di ardesia (la lavagna della scuola, così chiamata dal nome del comune ligure da cui viene estratto questo particolare tipo di roccia) posta su un tavolo rettangolare, di misura diversa a seconda del gioco praticato, con i bordi rialzati (le cosiddette "sponde") e con sei buche distribuite ai vertici e a metà dei lati lunghi. Le bilie impiegate sono d'avorio o di altro materiale, mentre le stecche possono essere di legno (più elastiche) o di alluminio (più leggere e maneggevoli).

La bilia d'attacco viene messa in movimento da un colpo più o meno secco e deciso della stecca che, imprimendole una forza per un certo intervallo di tempo, ne fa passare la velocità da zero (la bilia parte da ferma) a un determinato valore. Ragionando in termini fisici più rigorosi,

si può affermare che l'*impulso* fornito dalla stecca si tramuta in una variazione della *quantità di moto* della bilia, essendo appunto l'impulso la grandezza fisica corrispondente al prodotto di una forza per il tempo in cui essa viene applicata e la quantità di moto il prodotto della massa di un corpo per la sua velocità (in questo caso parliamo della bilia).

Il moto delle bilie può essere di tre diversi tipi:

- di pura *traslazione*, quando la bilia striscia rigidamente sul panno;
- di pura *rotazione*, quando la bilia rotola semplicemente senza strisciare;
- di *roto-traslazione*, quando la bilia striscia e, contemporaneamente, ruota su se stessa intorno a un definito *asse di rotazione*.

Nell'ipotesi di un colpo di stecca assestato esattamente al centro della bilia, questa inizia dapprima a muoversi strisciando, poi, via via che l'attrito con il panno ne riduce la velocità, cessa di strisciare per iniziare un moto di rotolamento puro.

Occorre tenere presente, infatti, che da ferma e durante il suo moto la bilia incontra sempre una resistenza sia a iniziare sia a proseguire il suo movimento data dalla forza di attrito del panno con il quale è costantemente in contatto. In particolare, esistono tre tipi di *attrito*:

- quello *statico*, presente fra superfici di contatto ferme, che rappresenta quindi la resistenza a iniziare un moto;
- quello *radente*, presente fra due superfici di contatto che strisciano l'una contro l'altra;
- quello *volvente*, attivo quando si ha invece un corpo che rotola su un altro.

Nel biliardo, in momenti diversi e talvolta contemporaneamente (l'attrito statico quando la bilia è ferma, i due attriti dinamici quando è in movimento) sono presenti tutti e tre i tipi di attrito.

Con buona approssimazione, la forza di attrito fra due superfici è costante e indipendente dalle velocità con cui queste si muovono.

Naturalmente, su superfici scorrevoli o lubrificate si manifesta una forza di attrito minore di quella presente su superfici ruvide o addirittura appiccicose.

Infine, per una data coppia di superfici, il *coefficiente di attrito statico* è sempre maggiore del *coefficiente di attrito radente* (anche se per alcuni materiali sono molto vicini in valore), e questo è sempre maggiore del *coefficiente di attrito volvente*, dove per coefficiente di attrito si intende proprio la misura di questa resistenza. Alcuni biliardi professionali hanno il panno riscaldato proprio per ridurre di una certa percentuale gli attriti dinamici.

Scopo principale del gioco del biliardo è colpire con la propria bilia quella dell'avversario o comunque le altre bilie disposte sul panno, sfruttando anche gli eventuali rimbalzi con le sponde: un capitolo importante della fisica del biliardo, quindi, riguarda gli urti.

Gli *urti* sono fisicamente di due tipi: *elastici* o *anelastici*. Per capire che cosa significano, oltre alla quantità di moto già vista occorre definire anche l'*energia cinetica traslazionale*, data dal semi-prodotto della massa di un corpo per il quadrato della sua velocità (un corpo in moto, perciò, è sempre dotato di una certa energia cinetica o di movimento).

Un urto si dice *elastico*, o *perfettamente elastico*, quando nel sistema preso in esame – per esempio due bilie – si conservano sia la quantità di moto sia l'energia cinetica totale, cioè quando queste grandezze hanno lo stesso valore sia prima che dopo l'urto.

In pratica, la bilia che prima era in movimento trasferisce in tutto o in parte la propria quantità di moto e la propria energia cinetica alla bilia ferma, in modo tale che le due quantità prima e dopo l'urto siano uguali. Nel caso limite di due bilie identiche e di un urto perfettamente centrale, la prima bilia dovrebbe fermarsi e la seconda iniziare a muoversi con la stessa velocità con cui si muoveva la prima.

Tutti i giocatori di biliardo (e non solo) sanno che gli urti perfettamente elastici esistono solo nei biliardi ideali; in quelli reali nessun urto è mai completamente elastico. Il caratteristico suono che udiamo al momento dell'impatto, per esempio, indica che parte dell'energia di movimento viene impiegata per creare l'onda sonora che si diffonde nell'ambiente. Ma non solo: dopo ogni urto in cui le bilie, seppur rigide, in una certa misura

si deformano comprimendosi e riespandendosi, infatti, la temperatura di queste aumenta leggermente, ovvero aumenta la loro energia interna.

In altre parole, una frazione più o meno consistente dell'energia cinetica macroscopica viene trasformata in energia cinetica microscopica (l'energia interna, appunto) degli atomi e delle molecole che costituiscono le bilie. Quindi, parte dell'energia cinetica iniziale della prima bilia viene impiegata per altri scopi oltre a quello di far muovere la seconda bilia dopo l'urto (senza considerare, ovviamente, l'attrito con il panno e la resistenza dell'aria). Si parla allora di *urti anelastici*.

In un urto anelastico la quantità di moto continua a conservarsi: le forze impulsive che agiscono durante un urto sono interne, generate dalla deformazione dei corpi durante il breve tempo in cui entrano in collisione, e perciò non modificano la quantità di moto del sistema; inoltre, durante un urto, le forze esterne – gravità, attrito, resistenza dell'aria – sono trascurabili rispetto a quelle interne, così come la variazione di quantità di moto che queste potrebbero generare. Se la quantità di moto continua a conservarsi, però, non si conserva più l'energia cinetica, mentre si conserva sempre l'energia totale del sistema: quella che prima dell'urto era tutta energia cinetica della prima bilia, dopo l'urto sarà diventata in parte energia cinetica delle bilie, in parte loro energia interna.

Sia che la bilia di attacco urti un'altra bilia, sia che urti una sponda, subirà un rimbalzo: ecco quindi entrare in gioco le leggi della riflessione, normalmente applicate ai raggi luminosi.

Secondo queste leggi, se una bilia colpisce una sponda con un certo angolo d'incidenza (che è l'angolo compreso fra la direzione iniziale di moto della bilia e la linea perpendicolare, o *normale*, alla sponda nel punto d'impatto), verrà riflessa con un angolo di riflessione esattamente identico all'angolo d'incidenza (l'angolo di riflessione è quello compreso fra la normale e la direzione finale di moto della bilia).

Le leggi della riflessione affermano anche che l'angolo di incidenza, la normale e l'angolo di riflessione giacciono tutti sullo stesso piano, cosa particolarmente facile da osservare nel biliardo dove tutto il gioco si

svolge sulla stessa superficie bidimensionale piana.

In pratica, nel biliardo la bilia è il raggio di luce e la sponda lo specchio che lo riflette: sapendo questo, è possibile calcolare (e prevedere) tutte le traiettorie.

Ma è proprio così?

Intanto, a interrompere la continuità delle sponde, troviamo le buche, cioè zone in cui la superficie piana del biliardo è incurvata: è qui che la gravità entra in gioco. Le tasche del biliardo, infatti, sono vere e proprie buche di potenziale gravitazionale. Non solo accolgono la bilia che vi è diretta, ma una bilia lenta che passi nelle loro estreme vicinanze può cadervi proprio in virtù della deformazione geometrica del piano di gioco.

Un aspetto ancora più rilevante è il fatto che colpendo con la stecca la bilia in posizioni diverse rispetto al centro le imprimiamo anche una rotazione intrinseca oltre al moto traslatorio: essa acquista *momento angolare*. In pratica, il momento angolare sta al moto rotatorio, come la quantità di moto sta al moto traslatorio, per il quale vale anche un principio di conservazione (nel caso di sistemi isolati).

Ma il fatto che la bilia, strisciando sul panno, ruoti su se stessa, significa anche che, oltre all'energia cinetica traslazionale, ha un'energia cinetica rotazionale che deve essere presa in considerazione quando applichiamo il principio di conservazione dell'energia. Ecco i motivi fisici per cui possono esistere colpi a seguire, colpi a rientrare, colpi a curvare, rimbalzi strani sulle sponde o fra bilie: è tutto dovuto alla rotazione intrinseca della bilia e alla sua interazione di attrito con il panno.

Un esempio tipico è quello della bilia di attacco che, anche dopo l'urto, segue per un po' la bilia colpita. Il *colpo a seguire* si ottiene colpendo la bilia in una posizione superiore rispetto al suo centro. Ovviamente questo fenomeno non rappresenta una violazione della conservazione dell'energia: la bilia di attacco, infatti, cede la sua energia cinetica traslazionale ma mantiene quella rotazionale, per cui, anche dopo l'urto, continua a ruotare su se stessa scivolando per un po' e cominciando infine a rotolare in avanti a causa dell'attrito con il panno. L'energia totale,

perciò, ancora una volta è conservata.

Quella che aumenta, irreversibilmente, è l'entropia del sistema e, con essa, l'entropia di tutto l'Universo. L'entropia infatti è la misura della quantità di disordine di un sistema: maggiore è l'ordine, minore è l'entropia.

È chiaro che, partendo da bilie ferme e ordinatamente sistemate a triangolo e arrivando a una situazione in cui tutte le bilie sono sparse per il tavolo, e per di più con una temperatura maggiore a causa degli urti (l'energia ordinata della bilia di attacco si è trasformata in energia disordinata delle molecole), l'entropia non può che essere aumentata e, di colpo in colpo, non può che continuare ad aumentare.

E non esiste alcuna possibilità di rimediare, perché anche risistemando a mano le bilie in posizione – riducendo così localmente l'entropia – avremo comunque convertito in calore (la forma più disordinata di energia) l'energia di legame (ordinata) di alcune molecole presenti nel nostro corpo: l'entropia totale dell'Universo aumenterà ancora. Ma questo, forse, al giocatore di biliardo poco importa perché, nonostante attriti, urti, riflessioni e princìpi di conservazione, se un colpo va male, è davvero colpa del suo autore!

Aspetta un momento… angolare!

Il momento angolare entra in gioco ogni volta che c'è qualcosa o qualcuno in rotazione: dalle bilie alle ballerine, dai pianeti alle trottole, dai dervisci rotanti alle ruote di bicicletta.

In un sistema isolato, oltre all'energia meccanica e alla quantità di moto si conserva anche il momento angolare. La proprietà del momento angolare di rimanere costante nel tempo in assenza di forze esterne che agiscano sul sistema (o, meglio, se il momento delle forze esterne che agiscono sul sistema è nullo), è all'origine di tantissimi fenomeni, il più conosciuto dei quali è sicuramente l'aumento della velocità di rotazione di una ballerina nel momento in cui, durante una piroetta, chiude le braccia allargate serrandole al petto. Così facendo, infatti, la ballerina varia il suo

momento d’inerzia, una grandezza fisica che dipende dalla distribuzione della massa intorno all’asse di rotazione.

Dal punto di vista fisico, il momento d’inerzia è una misura della resistenza di un corpo a variare il suo stato di moto rotatorio e può essere considerato la grandezza equivalente alla massa per quanto riguarda le rotazioni. La massa di un corpo, infatti, misura la sua resistenza a variare il suo stato di moto di traslazione, cioè a variare la sua velocità. Il momento d’inerzia, invece, misura la sua resistenza a variare la sua velocità angolare.

Per questo motivo, ogni volta che si deve affrontare lo studio del comportamento dinamico di un corpo in rotazione entra in ballo il momento d’inerzia e, con esso, il momento angolare, perché l’uno dipende strettamente dall’altro: quanto maggiore è il primo, tanto maggiore è il secondo.

Nel caso particolare della ballerina che ruota attorno a un asse verticale, quando questa ha le braccia allargate il suo momento d’inerzia rispetto a quell’asse è maggiore di quando le ha serrate al corpo.

Ora, in un moto rotatorio di questo tipo il momento angolare può essere espresso semplicemente con il prodotto del momento d’inerzia per la velocità angolare del corpo. Così, poiché questo prodotto deve rimanere costante in virtù del principio di conservazione del momento angolare, quando diminuisce uno dei due fattori, di conseguenza deve aumentare l’altro.

Ecco perché, a una diminuzione del momento d’inerzia della ballerina corrisponde un parallelo aumento della sua velocità di rotazione. Viceversa, se la ballerina allarga di nuovo le braccia, la sua velocità angolare deve diminuire perché, a fronte di questa ridistribuzione di massa attorno all’asse di rotazione, il suo momento d’inerzia aumenta. è evidente che la ballerina non è un sistema isolato, poiché su di essa agiscono almeno due forze: quella di gravità e le reazioni vincolari del pavimento su cui poggiano i suoi piedi. Il momento angolare, però, continua a conservarsi perché entrambe queste forze sono allineate all’asse di

rotazione della ballerina e quindi il loro momento è nullo.

Tu mi fai girar, tu mi fai girar, come fossi una… trottola

Quella di cui cantava Patty Pravo per la verità era una bambola, non una trottola, ma sempre di un gioco si tratta. E la trottola, a differenza della bambola, è un corpo rotante la cui dinamica è davvero interessante da studiare perché mostra in tutta la sua evidenza il fenomeno della *precessione*, ovvero il cambiamento della direzione dell'asse di rotazione durante il suo moto.

All'inizio la trottola, a cui sia stata impartita una velocità di rotazione sufficientemente elevata, si comporta esattamente come ci si aspetta: ruota attorno al proprio asse di simmetria (quasi) verticale rispetto al piano di appoggio. Anche la trottola, come la ballerina o il pattinatore sul ghiaccio, è soggetta alle solite due forze: quella di gravità, applicata nel suo baricentro (o *centro di gravità*: è il punto in cui si può pensare concentrato tutto il peso del corpo) e diretta verso il basso, e la *reazione vincolare*, diretta verso l'alto e applicata nel punto di contatto fra la trottola e il piano di appoggio. Naturalmente la loro somma è nulla ma, a differenza di quanto accade nel caso della ballerina, non è nullo il momento di questa coppia di forze.

Il motivo è presto detto: sia la forza-peso, sia la reazione vincolare sono verticali mentre l'asse di rotazione della trottola è sempre inclinato, anche solo leggermente, rispetto a questa direzione. Così, il centro di gravità non si trova esattamente sulla verticale del punto d'appoggio: da qui ha origine il momento della forza-peso il cui effetto è quello di far cadere la trottola appena questa non ruota sufficientemente veloce.

Con la trottola in rapida rotazione, quindi, il momento angolare diretto lungo l'asse di rotazione è perturbato dalla presenza di questo momento di forze che agisce facendo cambiare direzione al momento angolare senza tuttavia variarne l'intensità.

Il momento della forza-peso, infatti, diretto orizzontalmente, è perpendicolare al momento angolare: per questa ragione, la variazione di

questa grandezza – che non può rimanere costante proprio a causa di questo momento di forze – può avvenire solo in direzione ma non in intensità, e la variazione avviene lungo la direzione del momento della forza-peso. Il risultato è che l'asse della trottola, invece di puntare fisso in una direzione, ruota intorno alla verticale, con la trottola che resta inclinata senza cadere fino a quando la sua velocità di rotazione è sufficientemente elevata.

Inesorabili, però, intervengono l'attrito nel punto di contatto fra la trottola e il piano d'appoggio e la resistenza dell'aria: la sorte della trottola è segnata, la velocità di rotazione diminuisce e la trottola alla fine cade su un fianco, vittima di quel momento della forza-peso che non ha mai cessato di turbarle la rotazione.

Su scala molto più grande, anche la Terra si comporta esattamente come una trottola. Il suo asse di rotazione è solo apparentemente orientato in maniera fissa nello spazio, ma anch'esso è soggetto a un *moto di precessione*, causato dall'azione gravitazionale congiunta di Sole, Luna e pianeti vari. Per il nostro pianeta, un intero ciclo di precessione dura circa 26.000 anni. Un moto molto lento e quasi impercettibile, dunque, ma che gli astronomi possono misurare. Esso infatti fa sì che la Stella Polare, che per noi adesso indica quasi esattamente il Nord, 2000 anni fa non si trovasse nemmeno vicina alla direzione dell'asse di rotazione terrestre. Proprio come non lo sarà più fra 2000 anni.

Dunque un corpo in rapida rotazione intorno a un proprio asse di simmetria (o *asse giroscopico*), come appunto è la trottola, sta in piedi e, piuttosto che cadere, cambia la direzione del proprio asse. Solo gli attriti del mondo reale "condannano" la trottola alla caduta: è la loro presenza a causare la lenta ma inesorabile diminuzione di velocità angolare. Ora, maggiore è la velocità di rotazione della trottola, più difficile è deviare il suo asse: la precessione diventa davvero evidente solo quando la trottola inizia a rallentare.

Questo fatto viene chiamato *tenacia dell'asse giroscopico* ed è sfruttato con profitto in tante applicazioni e strumenti quotidiani, quali, per

esempio, la bicicletta.

Vi siete mai chiesti perché, quando andiamo in bicicletta è difficilissimo stare in equilibrio a velocità basse, mentre diventa banale e quasi naturale a velocità più alte? È sempre un gioco di momenti angolari, momenti di forze e tenacia degli assi di rotazione. A velocità basse, infatti, l'asse giroscopico – che in questo caso è individuato dal mozzo della ruota – è meno tenace, e una piccola inclinazione può far sì che il momento della forza di gravità ci tiri giù per terra praticamente indisturbato. Viceversa, a velocità alte il momento angolare è grande e la tenacia dell'asse giroscopico ci permette di restare dritti in sella, resistendo alle continue sollecitazioni della forza-peso. La prossima volta che andate in bicicletta, ricordatevi di ringraziare il momento angolare.

Fiat lux!

Abbiamo tirato tardi con la girata in bicicletta ed è calata la sera. Rientriamo a casa e, con un gesto automatico, premiamo un interruttore per accendere la luce nel corridoio.

La radiazione luminosa emessa dalla lampadina si diffonde immediatamente in tutto l'ambiente, illuminando pareti, mobili, oggetti che riacquistano i loro colori, altrimenti invisibili nell'oscurità. Una parte della luce viene sempre assorbita, una parte riflessa (ed è quella che vediamo e che dà colore all'oggetto) o, se l'oggetto ha una certa trasparenza come nel caso di un vetro di una finestra o della plastica di una bottiglia, un'altra frazione si trasmette attraverso il suo corpo per riemergere dalla parte opposta. Un vetro in grado di trasmettere quasi tutta la radiazione incidente è quasi invisibile: ecco perché a volte può capitare di andare a sbattere contro una vetrina appena lavata!

Noi vediamo le cose che ci circondano solo perché riflettono, almeno in parte, la luce che le illumina: riusciamo a distinguere i vari oggetti che si trovano nella stanza solo perché parte della frazione riflessa finisce nei nostri occhi. Fortunatamente ogni oggetto assorbe e riflette la luce in

maniera diversa dagli altri: questo dipende, in ultima analisi, dalla struttura atomica del materiale che forma la sua superficie. Così, alcuni oggetti sono più scuri perché riflettono meno luce, o più chiari perché ne riflettono molta; di colore blu perché assorbono soprattutto le radiazioni di altri colori riflettendo solo quella radiazione blu, o di colore rosso perché riflettono soprattutto la radiazione rossa assorbendo gli altri colori.

Se tutti gli oggetti che ci circondano assorbissero e riflettessero la luce esattamente alla stessa maniera, non saremmo in grado di distinguere un tavolino da una poltrona perché non ci sarebbero differenze di colore né di luminosità: dovremmo affidare la nostra capacità di vedere e riconoscere gli oggetti solo alla forma e alla direzione delle ombre che essi proiettano intorno a loro.

Ricordiamo che la radiazione visibile, cioè quella a cui sono sensibili i nostri occhi, è solo una piccolissima frazione dello spettro della radiazione elettromagnetica. Praticamente tutte le sorgenti luminose, lampadine comprese, emettono anche radiazione non visibile.

Il Sole, per esempio, emette su quasi tutto lo spettro elettromagnetico: raggi X, raggi ultravioletti e, dalla parte opposta dell'intervallo visibile (che va dal violetto al rosso passando per il blu, il verde, il giallo e l'arancione) raggi infrarossi, microonde e onde radio. Noi lo vediamo giallo perché la luce che emette dalla sua superficie a temperatura di quasi 5.800 K (circa 5500 °C) ha intensità massima alle lunghezze d'onda del giallo. Quella che vediamo del Sole, quindi, è una frazione importante della radiazione che esso produce, ma non l'unica.

Lo stesso vale per la lampadina a incandescenza: il filamento di tungsteno, che la corrente riscalda fino a una temperatura di 2700 K (oltre 2400 °C), emette solo una piccolissima frazione di luce visibile; la maggior parte della radiazione prodotta è costituita da raggi infrarossi che i nostri occhi non riescono a vedere. Tuttavia possiamo accorgerci della loro presenza: i raggi infrarossi, infatti, producono calore negli oggetti che colpiscono poiché eccitano le molecole facendole vibrare con maggiore intensità. Così noi li percepiamo direttamente, perché fanno aumentare

l'energia interna della nostra pelle e dei nostri recettori tattili, ma anche attraverso l'aria che avvolge la lampadina e che viene riscaldata, nello stesso modo, proprio dai raggi infrarossi emessi dal filamento.

Le lampadine a incandescenza trasformano in luce visibile solo una frazione molto bassa dell'energia elettrica assorbita; inoltre hanno una durata molto limitata perché il filamento si consuma quando la lampada è accesa: a causa dell'alta temperatura a cui si trova, infatti, il tungsteno *sublima* passando dallo stato solido a quello aeriforme.

La scarsa efficienza e la ridotta durata di queste lampadine ha portato all'invenzione di altre sorgenti luminose: le *lampade alogene*, per esempio, sono anch'esse a incandescenza ma la presenza nel bulbo di un gas alogeno (come lo iodio) permette da un lato di recuperare parte del tungsteno sublimato attraverso un processo chimico ciclico, e dall'altro di produrre una luce più bianca di quella emessa da una lampada a incandescenza tradizionale. Le lampade alogene durano circa il doppio e hanno un rendimento luminoso doppio rispetto alle altre.

Perché il ciclo alogeno funzioni, occorre che il bulbo della lampada si trovi ad alta temperatura. Per questo motivo, al posto del vetro normale viene usato vetro di quarzo, un vetro speciale resistente alle alte temperature. Il vetro di quarzo è trasparente alla radiazione ultravioletta emessa dalla lampada, ma poiché i raggi ultravioletti sono dannosi all'occhio e alla pelle, davanti al bulbo viene messa spesso una schermatura in vetro, come accade nei faretti alogeni. Lo schermo concavo dietro i faretti, invece, ha la funzione di assorbire la radiazione infrarossa in eccesso e riflettere verso l'ambiente solo la frazione di radiazione visibile emessa dal filamento.

Come le lampade a incandescenza tradizionali, anche le lampade alogene consumano molta energia. Per questo motivo, negli ultimi anni si è cominciato a diffondere nelle nostre case l'uso delle cosiddette "lampade a basso consumo", molto più ecologiche delle precedenti: a fronte di un consumo energetico ridotto, infatti, esse hanno una vita circa cinque volte più lunga di quella delle lampade a incandescenza o alogene, ma

soprattutto un rendimento luminoso fino a dieci volte maggiore. Questo tipo di lampade dette *a fluorescenza* funzionano in base a una scarica elettrica che, passando all'interno di un gas (generalmente vapori di mercurio), lo eccita provocando l'emissione di radiazione elettromagnetica (soprattutto alle lunghezze d'onda ultraviolette). I raggi ultravioletti colpiscono il materiale fluorescente che riveste le pareti interne del tubo della lampada che li assorbe eccitandosi: tornando in brevissimo tempo al suo stato non eccitato, esso riemette la radiazione assorbita sotto forma di luce visibile.

La luce visibile emessa da questo genere di lampade, quindi, non è prodotta direttamente dalla scarica nel gas, ma indirettamente, attraverso il processo di fluorescenza. Per funzionare, le lampade a fluorescenza hanno bisogno di alcune apparecchiature ausiliarie (come per esempio il dispositivo d'innesco della scarica elettrica) che in quelle per uso domestico sono di tipo elettronico e integrate nella base della lampada che può essere avvitata a un portalampada come una normale lampada a incandescenza.

La durata di queste lampade è strettamente legata al numero di accensioni a cui vengono sottoposte: a ogni accensione, infatti, gli elettrodi che danno origine alla scarica si consumano un po'. Per questo motivo, questo tipo di lampade è più adatto per ambienti che vanno illuminati per diverse ore (come la cucina o il soggiorno), piuttosto che per ambienti di passaggio, come il corridoio o il bagno.

Lo spettro di corpo nero

Ogni sorgente luminosa ha un suo spettro che dipende dalle sue caratteristiche fisiche, come la composizione o la temperatura.

In altre parole, la distribuzione in frequenza – o in lunghezza d'onda, che è lo stesso – dell'intensità della radiazione emessa non è uguale per tutte le sorgenti, ma anche questa è tipica di quella particolare sorgente.

Uno spettro molto importante in fisica è quello del cosiddetto *corpo nero*, il cui studio indusse Planck a introdurre il concetto di *quanti di luce*.

Un corpo appare nero se è in grado di assorbire completamente tutta la radiazione che lo colpisce. Tuttavia, anche un corpo nero emette una radiazione, ed essa ha l'importante proprietà di dipendere esclusivamente dalla temperatura a cui il corpo si trova. In natura esistono molte sorgenti con uno spettro simile a quello del corpo nero: fra queste abbiamo il Sole, insieme alle altre stelle, ma anche il filamento di tungsteno. Lo spettro del corpo nero "ideale" viene descritto da una particolare funzione individuata da Planck che permette di calcolare esattamente il modo in cui varia l'intensità della radiazione al variare della frequenza.

Per una sorgente che emette una radiazione caratterizzata da uno spettro simile a quello del corpo nero, vale una legge interessante chiamata *legge dello spostamento di Wien* (dal nome del fisico tedesco Wilhelm Wien, 1864-1928, che la enunciò per primo), o semplicemente *legge di Wien*. Essa stabilisce una proporzionalità inversa fra la temperatura a cui si trova la sorgente e la lunghezza d'onda a cui la radiazione ha il suo massimo d'intensità.

In altre parole, più è alta la temperatura della sorgente, minore è la lunghezza d'onda alla quale si ha il massimo dell'emissione.

Ora, ricordando che per la radiazione elettromagnetica le lunghezze d'onda diminuiscono passando dalle onde radio, alle microonde, all'infrarosso, all'intervallo visibile (dal rosso al violetto), all'ultravioletto, ai raggi X, ai raggi gamma, si capisce che una sorgente luminosa che ha il suo picco d'intensità nel blu deve essere più calda di una sorgente che ha il suo picco nel rosso (tanto per limitarci alla luce visibile). Così gli astronomi possono sapere che il Sole, che ha il suo massimo nel giallo (corrispondente a una temperatura di circa 6000 K), è più caldo di una stella rossa (che avrà una temperatura superficiale sui 3000 K), ma più freddo di una stella blu (a cui corrisponde una temperatura superiore ai 10.000 K). Per inciso: la tradizionale classificazione fra colori "caldi" che hanno toni sul rosso, e colori "freddi" con toni sul blu, è completamente ribaltata quando si tratta di fisica!

È interessante osservare che al picco di luminosità della radiazione solare

corrisponde proprio il colore – il giallo, appunto – in cui il nostro occhio ha la sua massima sensibilità: la luce solare è quella alla quale vediamo meglio.

Non tutti i sensori luminosi hanno la stessa curva di sensibilità spettrale dei nostri occhi, anzi: è vero il contrario. Esistono per esempio pellicole fotografiche più sensibili al rosso o anche all'infrarosso, e sensori elettronici per macchine fotografiche digitali più sensibili alla regione blu-violetta dello spettro visibile. Questo è il motivo per cui un'immagine ripresa con un sensore diverso dall'occhio umano non avrà di fatto mai gli stessi colori della scena vista "dal vivo".

In generale, infatti, un sensore artificiale percepisce meglio colori differenti da quelli che vede l'occhio umano, e registra peggio alcuni colori a cui il nostro occhio, invece, è più sensibile. La combinazione complessiva dei colori registrati da una pellicola fotografica, perciò, è necessariamente diversa da quella registrata dai nostri occhi.

La legge di Wien può essere derivata dalla funzione di Planck, ma rappresenta un modo molto semplice ed efficace di stimare la temperatura di una sorgente luminosa semplicemente osservandone il colore. La brace in via di spegnimento, per esempio, ha un colore rosso scuro che tradisce sia una temperatura di poche centinaia di gradi Celsius sia un picco di emissione nell'infrarosso (da cui deriva il calore che emette); la brace ancora molto calda, invece, ha un colore tendente all'arancione che indica sia una temperatura superiore (pari a diverse centinaia di gradi) sia un picco di emissione nel visibile. Analogamente, la luce emessa dal filamento di tungsteno della lampadina ci appare tendente al bianco proprio in virtù della sua alta temperatura.

Fisiologia dell'occhio umano

L'occhio è un sensore che si attiva ogni volta che la luce penetra al suo interno. Da un certo punto di vista, il suo funzionamento non è così diverso da quello di una macchina fotografica dove, al posto delle cellule fotosensibili della retina, si ha la pellicola o il sensore digitale. La parte

fotosensibile dell'occhio (la retina, appunto) è composta da due tipi di recettori:

- i *bastoncelli*, molto abbondanti e distribuiti soprattuto nelle regioni periferiche della retina, contengono un solo pigmento: per questo non percepiscono colori, ma solo variazioni di luminosità. Ciascun bastoncello è in grado di reagire anche a un solo fotone, ma produce una risposta neuronale molto lenta: così gli stimoli luminosi si sovrappongono, aumentando la sensibilità fotorecettiva;
- i *coni*, molto meno numerosi, si concentrano nella zona centrale della retina (la *fovea*) e contengono tre pigmenti, ciascuno dei quali dà una spiccata sensibilità a radiazioni con lunghezze d'onda diverse (cioè a colori differenti). I coni però sono poco sensibili all'intensità luminosa: ci vogliono centinaia di fotoni per attivarne uno. Ciò permette loro di avere un'alta velocità di risposta e di percepire i dettagli con un'alta risoluzione.

La fovea, dunque, è la parte più attiva alla luce, ma quasi inattiva al buio: per questo di notte vediamo poco i colori e i dettagli delle cose. Da qui ha origine anche il proverbio «di notte tutti i gatti sono bigi»: la luce diffusa della notte attiva solo i bastoncelli che non percepiscono i colori, e tutto sembra "bigio". Gli appassionati di astronomia sfruttano questa conoscenza per osservare a occhio nudo gli oggetti celesti più deboli: guardandoli senza puntare direttamente gli occhi sulla fonte di luce, fanno in modo che questa cada dove si trovano i bastoncelli. Una tecnica chiamata *visione distolta*.

Se da un ambiente illuminato passiamo in uno completamente al buio, all'inizio non siamo in grado di vedere assolutamente niente: i bastoncelli, infatti, sono in grado di funzionare solo dopo un breve periodo di adattamento alle nuove condizioni di luminosità, permettendoci così di distinguere progressivamente forme e dimensioni sempre più numerose, anche in una stanza quasi del tutto buia. Provate a sedervi in una stanza chiusa e al buio, e aspettate 15 min circa: vi stupirete della capacità che hanno i vostri occhi di vedere!

Amplificare le capacità visive

Dei cinque sensi, la vista è quello più sfruttato e l'occhio, l'organo sensoriale della vista, è uno strumento sottoposto continuamente a stimoli di carattere luminoso (a parte, ovviamente, quando stiamo a occhi chiusi!). Il mondo che ci circonda, per noi, è soprattutto un universo di luci e colori, e l'immagine che ne abbiamo è, soprattutto, quella che di esso ci mostrano i nostri occhi. Il contributo dato dagli altri sensi, pur fondamentali, è secondario. Ciò vale ancor più per lo studio di corpi lontani (come accade per esempio in astronomia) o molto piccoli (come succede in microbiologia), dove la luce disponibile è molto limitata. L'evoluzione ci ha dotato di uno strumento eccezionale, capace di distinguere fra infinite tonalità di colore, di percepire il movimento anche in condizioni di bassissima illuminazione, di mettere a fuoco oggetti vicini e lontani nello stesso tempo. Ma anche il nostro occhio ha capacità limitate: per questo motivo, nel corso dei secoli gli scienziati hanno inventato strumenti che permettessero di superare questi limiti, in particolare di visione di oggetti piccolissimi o lontanissimi, dalla luminosità debolissima.

E inizialmente lo hanno fatto cercando di replicare le caratteristiche strutturali dell'occhio. Microscopi e telescopi, i primi costruiti per ingrandire oggetti piccolissimi e renderli visibili all'occhio, i secondi realizzati per osservare corpi lontanissimi da noi, possono essere considerati come estensioni dell'occhio che ne aumentano le possibilità oltre i limiti imposti dalle potenzialità fisiche e fisiologiche.

I microscopi ottici continuano a essere prodotti combinando lenti di vario tipo; i telescopi sono costruiti con lenti, ma anche con specchi. Il meccanismo di fondo, tuttavia, non cambia: lo scopo è quello di raccogliere la luce, focalizzarla in un punto e infine ingrandire l'immagine che si forma. Sono esattamente gli stessi princìpi su cui si basa la costruzione delle lenti per un paio di occhiali.

La disciplina che studia i fenomeni luminosi e gli strumenti relativi è una branca della fisica chiamata *ottica*. Storicamente è divisa in *ottica geometrica* e *ottica fisica*: entrambe studiano i fenomeni ottici, ma se la

prima lo fa sulla base di un modello astratto in grado di spiegare i fenomeni più semplici (come la riflessione e la rifrazione, le cui leggi illustrano il comportamento di un raggio luminoso che colpisce la superficie di separazione tra 2 mezzi contigui), la seconda si basa sulla teoria ondulatoria della luce e sulla teoria delle onde elettromagnetiche, spiegando fenomeni più complessi (come la diffrazione, di cui abbiamo parlato a proposito di onde sonore).

NON SOLO LUCE

L'energia elettrica è un bene prezioso per le nostre case. Non permette soltanto di accendere la luce quando rincasiamo, ma anche di garantire il funzionamento di una quantità incredibile di elettrodomestici e altri dispositivi: dal frigorifero alla lavatrice, dal computer alla televisione, dalla consolle per videogiochi al ventilatore. Senza l'energia elettrica non potremmo neppure ricaricare il nostro telefono cellulare né ascoltare l'impianto stereo, né cucinare con il forno a microonde. Le nostre vite sono ormai indissolubilmente legate all'energia elettrica.

A portare l'elettricità nelle nostre case è una fitta e intricatissima rete di distribuzione costituita da cavi elettrici (nella maggior parte dei casi sospesi, ma anche sotterranei o subacquei) che partono dalle centrali di produzione e finiscono per arrivare in ogni appartamento, anche dopo aver percorso diverse centinaia di kilometri.

Qualunque sia la fonte energetica primaria – combustibili fossili nelle centrali termoelettriche, acqua in quelle idroelettriche, uranio o plutonio in quelle termonucleari, calore terrestre in quelle geotermiche, vento in quelle eoliche e così via – le centrali elettriche basano il loro funzionamento sulla conversione di energia meccanica (l'energia cinetica di rotazione di una turbina) in energia elettrica per mezzo di un alternatore.

A permettere questa trasformazione è una legge fondamentale della fisica: quella sull'*induzione elettromagnetica*. Formulata da Michael Faraday (1791-1867) nel 1831, e per questo nota anche con il nome di

legge di Faraday, questa legge stabilisce che in un circuito immerso in un campo magnetico variabile oppure in un circuito in movimento immerso in un campo magnetico costante si “induce” un passaggio di corrente.

In altri termini, la legge di Faraday sostiene che un campo magnetico variabile nel tempo induce il passaggio di corrente elettrica all’interno di un circuito chiuso che si trovi soggetto all’azione di questo campo magnetico. Ovviamente un campo magnetico costante può variare perché il circuito al suo interno si muove: il risultato non cambia, e produce nel circuito una forza elettromotrice indotta che genera il passaggio di corrente elettrica, esattamente come se a questo fosse applicata una batteria.

Questo fenomeno, alla base del funzionamento di motori elettrici, alternatori, dinamo e trasformatori, si chiama – appunto – *induzione elettromagnetica* ed è una delle principali scoperte del XIX secolo.

Nelle centrali elettriche, dunque, è l’alternatore il vero e proprio generatore di corrente elettrica. Esso è formato da 2 parti fondamentali, su ciascuna delle quali sono avvolti cavi di rame isolati gli uni dagli altri: la prima parte, fissa, è lo *statore*; la seconda, che ruota in modo solidale con la turbina, e il *rotore*. Dal punto di vista elettrico, è l’avvolgimento sul rotore che induce la corrente nell’avvolgimento dello statore. Per questo motivo, il primo avvolgimento di rame prende il nome di *induttore*, mentre il secondo si chiama *indotto*.

Proprio in virtù del meccanismo con cui viene prodotta, la corrente uscente dall’alternatore è, appunto, alternata, cioè varia in maniera ciclica con un andamento sinusoidale.

È diversa dalla corrente continua generata, per esempio, dalle batterie, o da alcuni tipi di alimentatore come quelli impiegati nei computer portatili o nei caricabatteria dei cellulari.

La scelta se diffondere l’uso della corrente continua o di quella alternata fu il risultato di una vera e propria battaglia per il predominio industriale fra due grandi inventori del XIX secolo: lo statunitense Thomas Alva Edison (1847-1931), già inventore del fonografo e detentore del brevetto (contestato) per l’invenzione della lampada a incandescenza, fervido

sostenitore della corrente continua, e il serbo Nikola Tesla (1856-1943), geniale immigrato negli Stati Uniti per trovare fortuna e accanito sostenitore della corrente alternata, al quale una sentenza del 1943 della corte suprema statunitense attribuì anche la paternità dell'invenzione della radio, considerata fino ad allora frutto dell'ingegno di Marconi. Al termine di quella che venne chiamata *guerra delle correnti*, la spuntò proprio Tesla per la grande facilità con cui è possibile modificare i valori di tensione nei circuiti a corrente alternata grazie all'impiego di appositi dispositivi detti, per questa loro funzione, *trasformatori*.

Nella sua essenza, un trasformatore è costituito da 2 conduttori elettrici – tipicamente fili di rame – avvolti intorno a un anello di materiale ferromagnetico (il cosiddetto "nucleo magnetico").

Quando nel primo avvolgimento (detto "primario") viene fatta passare una corrente variabile nel tempo – com'è la corrente alternata – nel secondo avvolgimento (detto "secondario") si induce una corrente per la presenza del campo magnetico prodotto dal materiale ferromagnetico e in virtù della legge di Faraday. La tensione nel circuito primario e la tensione nel circuito secondario sono legate da una semplice relazione: il loro rapporto è pari al rapporto fra il numero di spire del primario e il numero di spire del secondario. Così, se il circuito primario è avvolto 10 volte attorno al nucleo ferromagnetico e il circuito secondario è avvolto 100 volte, la tensione in uscita nel circuito secondario è 10 volte quella in entrata nel circuito primario. Vale anche il ragionamento inverso: se le spire del circuito primario sono in numero superiore a quelle del secondario, la tensione in uscita da quest'ultimo sarà ridotta in proporzione.

Questo rapporto prende il nome di *rapporto di trasformazione* ed è costante per ciascun trasformatore (è un parametro di fabbricazione). Ora, poiché in un trasformatore vale la legge di Faraday, è necessario che la corrente elettrica nel primario sia variabile, non continua. Una corrente continua – costante nel tempo – infatti, non è in grado di indurre il passaggio di corrente nel secondario. Una corrente alternata, invece, lo può

fare, e la corrente in uscita dal secondario ha esattamente le stesse caratteristiche temporali di quella in entrata nel primario.

Così, una corrente alternata a 50 Hz (come quella della nostra rete elettrica) induce una corrente alternata sempre a 50 Hz. In pratica, un trasformatore modifica solo le tensioni e, di conseguenza, le intensità di corrente, ma non la periodicità con cui queste tensioni oscillano.

Il motivo per cui è molto importante essere in grado di trasformare i valori di tensione è legato alle modalità di trasporto dell'energia elettrica. Quando un circuito viene percorso da corrente elettrica, parte dell'energia viene dissipata sotto forma di calore. La causa ultima è, naturalmente, la resistenza al movimento degli elettroni propria del conduttore. In particolare, più alto è il valore dell'intensità di corrente che percorre il circuito, maggiore è la quantità di energia dissipata: essa porta a un aumento dell'energia interna del materiale conduttore e, in definitiva, a un incremento di temperatura.

Questo fenomeno, noto come *effetto Joule*, dal nome di James Prescott Joule che per primo lo osservò nel 1840, porta al riscaldamento di tutti i circuiti elettrici in cui passa corrente e, sebbene rappresenti una perdita netta di energia elettrica e da esso derivi una riduzione del rendimento delle macchine elettriche, viene sfruttato proficuamente in molti dispositivi elettrici domestici quali la lampada a incandescenza, l'asciugacapelli, il forno e lo scaldabagno elettrici e altri ancora.

Tutti questi macchinari sfruttano l'aumento di temperatura del conduttore percorso da corrente per produrre a loro volta variazioni termiche. Anche il fusibile sfrutta l'effetto Joule per proteggere gli altri elementi del circuito: quando la corrente che lo attraversa supera un certa soglia prefissata, il filo fonde – da cui il nome di *fusibile* – aprendo immediatamente il circuito e interrompendo così il passaggio di corrente. In questo modo impedisce che un eccessivo passaggio di corrente possa danneggiare il circuito stesso.

La potenza trasmessa lungo una linea elettrica è proporzionale al prodotto fra la tensione e l'intensità di corrente, mentre le perdite per

effetto Joule aumentano all'aumentare della corrente stessa. A parità di potenza trasmessa, è quindi possibile diminuire le perdite diminuendo drasticamente l'intensità di corrente, aumentando nel contempo la tensione di alimentazione del circuito.

Questo è esattamente quanto viene fatto nelle centrali elettriche, dove, prima che l'energia venga trasferita agli elettrodotti perché la convoglino verso le utenze finali (città, industrie ecc.), viene abbassata l'intensità della corrente prodotta dall'alternatore, innalzando la tensione di uscita grazie a un apposito trasformatore.

Per gran parte del tragitto dalla centrale elettrica fino a noi, la corrente che percorre i cavi dell'elettrodotto è bassissima ma è invece molto alta la tensione che ha un valore pari a 380.000 volt (V). Per questo motivo, i cavi vengono detti "dell'alta tensione".

Solo in prossimità delle utenze questa tensione viene abbassata attraverso una rete di centrali di trasformazione dove sono in funzione i trasformatori e, passando attraverso valori intermedi, viene portata ai 220 V dell'utenza domestica (o ai 380 V di quella industriale). Con ovvio e conseguente aumento della corrente, da cui deriva l'effetto Joule che si osserva negli elettrodomestici di casa.

Così, quando accendiamo la luce non facciamo altro che chiudere un circuito lungo anche diverse centinaia di kilometri, portando la tensione da 220 V fino a "terra" grazie al passaggio di corrente all'interno del filamento. Questo passaggio di corrente elettrica rappresenta quindi anche una caduta di tensione: è un fenomeno che può essere considerato in tutto e per tutto analogo a quello di una corrente d'acqua che passa da una certa quota – e quindi da una certa energia potenziale gravitazionale – a una quota più bassa, fino a tornare al livello del mare (equivalente appunto alla "terra" degli elettricisti), dove la sua energia potenziale gravitazionale è di nuovo nulla.

Conduco o non conduco, questo è il problema

Analizzando i vari modi con cui si trasporta il calore, abbiamo parlato

della conducibilità termica. Questa proprietà dei materiali ha un suo analogo elettrico che prende il nome di *conducibilità elettrica specifica* e che, come per quella termica, varia da materiale a materiale. Non tutti i materiali, infatti, sono in grado di condurre elettricità, anzi: sono molti di più i materiali cosiddetti “isolanti” che non quelli cosiddetti “conduttori”.

In generale, un materiale dotato di una buona conducibilità termica ha anche una buona conducibilità elettrica. Questo è vero in particolare per molti metalli, come il rame, l’argento e l’oro, tutti dotati di ottime conducibilità termiche ed elettriche.

Il motivo di questo fatto è legato alla particolare struttura cristallina dei metalli, dove gli atomi si dispongono lungo file ordinate e gli elettroni più esterni di ciascun atomo, detti *elettroni di conduzione*, sono condivisi con tutti gli altri atomi piuttosto che rimanere vincolati all’atomo originario di appartenenza.

Nel momento in cui viene applicata una tensione, grazie a questa particolare struttura gli elettroni di conduzione sono quasi del tutto liberi di muoversi lungo il reticolo cristallino, trasportando così la corrente – che è proprio costituita dal movimento degli elettroni o, più in generale, dal moto di cariche elettriche – attraverso il conduttore.

La conducibilità elettrica dipende esclusivamente dalle caratteristiche fisiche del materiale. Il suo inverso si chiama *resistività*, una grandezza che definisce quanto il materiale si oppone al passaggio di corrente.

La conducibilità elettrica specifica o *conduttività* e la resistività sono, come la conducibilità termica, proprietà intensive. Ma anche per quanto riguarda le grandezze elettriche, esistono delle analoghe proprietà estensive.

Particolarmente importante, per i conduttori, è la *resistenza* che, oltre a essere direttamente proporzionale alla resistività, dipende anche dalle caratteristiche costruttive del filo conduttore, ovvero dalla sua lunghezza e dalla sua sezione (cioè dall’area che si ottiene tagliando il cavo perpendicolarmente alla direzione di percorrenza della corrente). È abbastanza intuitivo comprendere che più il filo è lungo, maggiore è la sua

resistenza, laddove un filo a sezione più grande oppone minore resistenza, perché da una certa sezione del filo possono passare più elettroni nell'unità di tempo.

Per un circuito di materiale conduttore percorso da corrente vale un'importante legge fisica: la *legge di Ohm*, dal nome del fisico tedesco Georg Simon Ohm (1789-1854) che la scoprì nel corso dei suoi studi sulle correnti elettriche e la pubblicò in un trattato nel 1827.

La legge di Ohm, che rappresenta il primo vero strumento per l'analisi quantitativa dei circuiti elettrici, stabilisce la proporzionalità diretta fra la tensione applicata a un circuito e la corrente che lo attraversa. La costante di proporzionalità è proprio la resistenza del circuito.

In pratica, a parità di tensione applicata, in un circuito con una maggiore resistenza (*carico resistivo*) passerà una corrente minore mentre, viceversa, in presenza di un carico resistivo minore corrisponderà un'intensità di corrente maggiore.

È importante sottolineare che la legge di Ohm è valida solo ed esclusivamente per i materiali conduttori e che ha anche un'ulteriore limitazione: la relazione lineare fra tensione applicata e intensità di corrente vale infatti solo per correnti non troppo elevate. Quando all'interno di un circuito si forza il passaggio di una corrente molto alta, questo si riscalda per effetto Joule, provocando una variazione della sua resistenza elettrica e, in particolare, della sua resistività, la quale dipende proprio dalla temperatura.

In generale, per i materiali conduttori, maggiore è la temperatura, maggiore è la resistività. A una maggiore agitazione termica del reticolo cristallino corrisponde infatti una maggiore probabilità di urti con gli elettroni di conduzione, i quali si spostano con più difficoltà lungo il cristallo. La legge di Ohm, quindi, vale fintanto che la resistenza del circuito rimane sostanzialmente costante, ovvero per piccole variazioni di temperatura.

In natura però esistono anche materiali che si comportano da isolanti, non lasciandosi assolutamente attraversare da alcuna corrente elettrica.

Questi, a differenza dei conduttori, hanno valori di resistività molto alti.

I metalli come l'argento, il rame e l'oro hanno per esempio resistività molto basse e assai simili fra loro, miliardi di miliardi di volte minori di quella del vetro il quale, a sua volta, ha una resistività da decine a migliaia di volte inferiore a quella di certe materie plastiche, come il polietilene (il materiale usato per imbottigliare acque minerali e bibite) o il teflon® usato come antiaderente in pentole e padelle.

Gli elevati valori di resistività dei materiali isolanti sono ancora una volta dovuti al comportamento degli elettroni più esterni degli atomi che compongono il materiale, comportamento che tuttavia è profondamente diverso da quello osservato nei conduttori. Negli isolanti, infatti, gli elettroni esterni non sono liberi di muoversi attraverso il reticolo cristallino, ma sono strettamente vincolati nei legami molecolari che collegano ciascun atomo a quelli contigui.

Così limitati nel movimento, questi elettroni detti "di valenza" che partecipano ai legami chimici fra atomi e molecole, non sono in grado di condurre elettricità e impediscono il passaggio di corrente attraverso il materiale.

Ma esistono anche materiali con caratteristiche a metà strada fra i conduttori e gli isolanti: sono i cosiddetti *semiconduttori*, diffusissimi nelle nostre case.

Tutti i componenti elettronici e microelettronici, dai transistor fino ai circuiti integrati, ormai presenti non solo nei computer ma in gran parte degli elettrodomestici, infatti, sono realizzati con materiali semiconduttori, il principale dei quali è il silicio.

La resistività dei semiconduttori ha quindi valori tipicamente intermedi fra quelli bassissimi dei conduttori e quelli altissimi degli isolanti, ma può essere opportunamente modificata tramite un particolare processo di lavorazione del materiale, consistente nell'inserimento di impurità, ovvero di atomi di un'altra specie.

Questo procedimento, chiamato tecnicamente *drogaggio del semiconduttore*, è in grado di alterare alcune caratteristiche fisiche del

materiale, come appunto la resistenza, la mobilità e la concentrazione dei portatori di carica che possono essere selezionate in maniera opportuna a seconda dell'uso che s'intende fare del semiconduttore.

In altre applicazioni, come nei transistor, la resistività dei semiconduttori può essere variata anche applicando un campo elettrico, o con l'esposizione alla luce, proprio come accade nei sensori delle macchine fotografiche digitali realizzati con materiale semiconduttore.

Anche la temperatura è in grado di influenzare la resistività dei semiconduttori, ma in maniera opposta a quanto accade nei conduttori. Se infatti nei conduttori un innalzamento di temperatura produce un aumento della resistività, nei semiconduttori a una temperatura più alta in genere corrisponde una diminuzione della resistività e quindi una maggiore disponibilità del materiale a far passare corrente elettrica.

Tutte queste caratteristiche specifiche dei semiconduttori vengono sfruttate in campo industriale proprio per realizzare componenti e dispositivi elettronici, impiegati negli usi più svariati: diodi, transistor, dispositivi ad accoppiamento di carica (CCD), memorie per computer, microprocessori ecc… provate a contare quanti apparecchi avete in casa che impiegano dispositivi a semiconduttore come quelli appena citati: scoprirete, forse con stupore, di essere circondati e di non poter più fare a meno di loro.

Se ancora avete qualche dubbio e siete convinti che in casa vostra, non essendoci il computer, i semiconduttori non sono entrati, contate quanti telefoni cellulari vi portate dietro o anche solo quanti telecomandi avete in soggiorno: il segnale che, una volta premuto un pulsante, dice al televisore di accendersi o al videoregistratore di cominciare a registrare, è inviato da un LED (dall'inglese *Light Emitting Diode*, ovvero diodo a emissione di luce), una sorta di lampadina colorata che altro non è che uno dei dispositivi a semiconduttore più usati e diffusi. Nei telecomandi, in genere si usano LED a infrarossi, ma esistono LED praticamente di tutti i colori, rossi, verdi, blu, consumano poco, durano tanto, e danno colori brillanti. Ecco perché adesso molti schermi e insegne luminose sono fatti con questi

piccoli ma efficienti dispositivi!

Dal tam tam al bip bip

Comunicare e, soprattutto, telecomunicare, cioè comunicare a distanza, è sempre stato un problema di cruciale importanza: per l'uomo primitivo la sopravvivenza stessa della tribù era fondata sulle capacità di segnalare tempestivamente il sopraggiungere di un pericolo, oppure di avvisare gli altri cacciatori su quale fosse il luogo più propizio.

Dalle prime rudimentali tecniche, basate sull'emissione di suoni naturali (urla, grugniti, versacci), si passò poi abbastanza rapidamente a soluzioni artificiali, consistenti nella produzione di rumori con strumenti di vario genere (bacchette di legno, tam tam ecc.). Parallelamente alle segnalazioni acustiche si svilupparono anche le prime tecniche ottiche (gesti, segnali di fumo, fuochi ecc.), in certi casi più efficienti. Ancora oggi, pur con tutte le innovazioni tecnologiche esistenti, troviamo in uso alcune di queste tecniche. D'altra parte, anche i modi di comunicare moderni si basano, con modalità diverse, sulla trasmissione di suoni, luci o immagini, come già quelli primitivi.

Così, nei secoli, si sono cercate via via soluzioni più avanzate per comunicare a distanza e, come potevamo immaginare, i motori primi dello sviluppo tecnologico delle telecomunicazioni sono stati business e guerra. E mentre sulla terraferma c'era ancora il messaggero a cavallo, l'aumento dei traffici marittimi mercantili e militari favorì l'ideazione di sistemi di segnalazione fra navi, come per esempio l'alfabeto semaforico o l'eliografo, telegrafo ottico che trasmette segnali luminosi servendosi di specchi che riflettono la luce solare (da cui il nome) o una luce artificiale.

In effetti, il primo telegrafo ottico, cioè basato ancora su segnali visibili a distanza, fa la sua comparsa nel 1794. Tuttavia, per trovare la prima vera tecnologia delle telecomunicazioni occorre attendere il 1844, quando Samuel Morse (1791-1872) con la frase biblica «Così ha permesso Iddio!» inaugura la prima linea telegrafica della storia, quella che collega

Washington a Baltimora.

Per la verità un telegrafo elettrico era già stato inventato nel 1837, ma solo l'invenzione del rivoluzionario codice a impulsi e del telegrafo capace di trasmetterli rese veramente praticabile questa strada. Nel 1843, grazie ad amicizie politiche, Morse ottenne finalmente il finanziamento dei 30.000 dollari necessari alla realizzazione del progetto di linea telegrafica. La risonanza dell'invenzione fu tale che i giornali vollero immediatamente dotarsi di telegrafo, inaugurando così, per il mondo dell'informazione, l'era delle notizie trasmesse in tempo reale.

Il vero salto di qualità nella tecnologia delle telecomunicazioni, però, è rappresentato dall'invenzione del telefono che segna la definitiva liberazione dalla schiavitù dei segnali in codice: con esso far sentire la propria voce a miglia di distanza diventa finalmente una realtà. Il telefono, infatti, è in grado di trasformare la voce in segnali elettrici, di far viaggiare questi anche per enormi distanze, e di ritrasformarli nuovamente in onde sonore che possono essere udite all'altro capo della linea di trasmissione. Onde di pressione trasformate in variazioni di corrente e tensione e viceversa: un'idea davvero geniale, sulla cui paternità si scatenò una delle più accese dispute della storia della tecnologia.

La battaglia legale che s'instaurò fra Meucci e Bell per la paternità dell'invenzione forse più importante nel mondo delle telecomunicazioni si concluse nel 1887 a favore di Bell, nonostante l'inventore italiano avesse brevettato il suo apparecchio nel 1871, ben 5 anni prima dello scozzese. Purtroppo il suo stato di miseria non permise a Meucci di dare la massima copertura al suo brevetto, per cui fu costretto a lasciarlo decadere. Bell, nel 1876, approfittò della favorevole situazione e brevettò un modello perfezionato di telefono, il cui funzionamento però ricalcava sostanzialmente quello del telefono di Meucci. Il primo messaggio trasmesso per via telefonica fu il monologo dell'Amleto («Essere o non essere…»), durante l'esposizione mondiale di Filadelfia di quell'anno.

Solo nel 2002, una risoluzione del Congresso degli Stati Uniti ha reso giustizia (postuma, purtroppo) al nostro connazionale, riconoscendogli in

via definitiva la paternità dell'invenzione.

Con il telefono le comunicazioni si erano affrancate dai messaggi in codice, ma non dai cavi di trasmissione, la cui posa aerea, sotterranea o sottomarina, rappresentava il maggior contributo ai costi di realizzazione degli impianti.

Solo in seguito agli studi sull'elettromagnetismo di Maxwell e Faraday e alla conseguente scoperta dell'esistenza delle onde elettromagnetiche, compiuta dal fisico tedesco Hertz nel 1886, si aprirà la strada alla seconda grande rivoluzione delle tecnologie per le telecomunicazioni.

Il primo a capire l'importanza della trasmissione a distanza *via etere* è il nostro Guglielmo Marconi (1874-1937) che, nel settembre del 1895, compie i primi esperimenti di telegrafia senza fili, riuscendo a inviare segnali elettromagnetici fra due punti distanti 1 km e mezzo. Con scarsa larghezza di vedute, l'allora ministro italiano delle Poste e dei Telegrafi rifiutò l'offerta gratuita dell'invenzione, cosicché Marconi, grazie ad alcune amicizie politiche, si rivolse al ministro delle Poste inglese che, intuendo subito la potenzialità dell'idea, gli permise finalmente di brevettare in Gran Bretagna il telegrafo senza fili: era il 2 giugno del 1896. Fondando una società ancora oggi chiamata Marconi, l'italiano ottenne addirittura l'*imprimatur* della regina Vittoria. Pochi anni dopo, il 12 dicembre 1901, Marconi celebrò l'inizio del XX secolo con la prima trasmissione radio transatlantica fra una base in Cornovaglia e una in Terranova.

È curioso notare che l'esperimento riuscì non tanto per le convinzioni di Marconi – che credeva che le onde radio seguissero la curvatura terrestre (contrastate per altro da molti fisici) – ma per il fatto che le onde vengono riflesse dalla ionosfera e solo per questo possono davvero seguire la curvatura della Terra.

L'invenzione procurò subito a Marconi fama internazionale (tanto che vinse il premio Nobel per la fisica nel 1909), ma anche l'ostilità di tutti coloro che fondavano i loro affari sulla telegrafia tradizionale.

Particolarmente accanita contro Marconi fu la società *Anglo-American*

Cable Company che, dopo la posa del primo cavo transatlantico, deteneva il monopolio delle comunicazioni fra il vecchio e il nuovo continente: lo citò in giudizio, boicottò le sue stazioni di trasmissione, gli impedì l'uso di altre. Nonostante tutto, la telegrafia senza fili s'impose molto rapidamente a livello mondiale anche se la sua definitiva affermazione fu dovuta alla tragedia del *Titanic*, il transatlantico affondato da un iceberg nel suo viaggio inaugurale (1912): l'S.O.S. lanciato dalla nave grazie al telegrafo inventato da Marconi, infatti, consentì di salvare almeno parte dei passeggeri.

Assieme alle *fibre ottiche* sempre più diffuse, una sorta di cavi in cui viaggia un fascio luminoso con minime dispersioni del segnale, la trasmissione di segnali elettrici via cavo e, soprattutto, di onde elettromagnetiche via etere rappresenta ancora oggi il principale modo di comunicare a distanza.

In effetti, noi viviamo letteralmente immersi in un mare di onde elettromagnetiche e, in particolare, di onde radio e microonde: ra-dio, televisione, telefoni cellulari, telefoni *cordless*, connessioni *wireless* (= senza fili) come quelle *wi-fi*… tutti questi oggetti si basano sulla trasmissione e sulla ricezione di questo genere di onde. Ogni canale radiofonico, ogni canale televisivo, ogni numero di telefono cellulare ha la sua precisa frequenza di riferimento e trasmette solo su quella. Solo così le onde possono viaggiare nello spazio e arrivare a destinazione inalterate.

Le onde di ciascuna frequenza si muovono senza mescolarsi mai, ed è quindi sufficiente filtrare la frequenza giusta per ricevere la trasmissione desiderata. Il principio di base è sempre la legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday: quando un'onda elettromagnetica investe un'antenna – delle dimensioni e della forma appropriata – induce in essa un passaggio di corrente elettrica che costituisce, appunto, il segnale elettrico da decodificare per interpretare i contenuti della trasmissione. Sono proprio le caratteristiche geometriche dell'antenna a definirne le prestazioni e la sua capacità di ricevere o trasmettere certe bande di frequenza piuttosto che altre.

L’onda elettromagnetica di frequenza definita, specifica per ciascun canale di trasmissione, si chiama *onda portante*. Il suo nome deriva naturalmente dal fatto che essa “porta” il segnale vero e proprio, codificato in qualche maniera. Le tecniche maggiormente usate per trasmettere i segnali sono la modulazione di ampiezza (abbreviata in AM) e la modulazione di frequenza (FM). Nel primo caso, il segnale viene trasmesso modulando opportunamente l’ampiezza dell’onda portante, ovvero apportando istante per istante piccole variazioni all’ampiezza di questa. Analogamente, nella modulazione di frequenza sono piccole variazioni di frequenza dell’onda portante a trasportare il segnale.

In pratica, l’onda portante è un vero e proprio supporto sul quale viene “appoggiato” il segnale da trasmettere. Ovviamente né le variazioni di ampiezza né, soprattutto, le variazioni di frequenza sono tali da far sovrapporre l’onda portante di quel determinato canale alle onde portanti dei canali contigui.

Modulazione di ampiezza e modulazione di frequenza sono tecniche diffusissime di trasmissione dei segnali elettromagnetici, e sono ampiamente applicate nella radio, nella televisione, nella telefonia, nelle comunicazioni *wireless*.

Le tecniche di modulazione possono essere sia analogiche sia digitali. In questo secondo caso, il segnale da modulare è costituito da un’informazione in formato binario, cioè da una sequenza di 0 e di 1. Una tipica applicazione di modulazione digitale è appunto quella che si verifica nei modem.

È interessante notare che i telefoni cellulari operano nella banda di frequenza delle microonde, ovvero ricevono e trasmettono onde elettromagnetiche di frequenza simile – e talvolta molto vicina – a quella impiegata nei forni. Se in questo momento vi state domandando perché il telefono cellulare non fa bollire l’acqua (abbondante) contenuta nel nostro cervello, la risposta è molto semplice: la potenza delle microonde emesse da un telefono cellulare in funzione è, in genere, almeno 1000 volte più bassa di quella delle microonde raccolte nel forno. Questa potenza è

sufficiente per trasmettere e ricevere le telefonate, ed è tale da non danneggiare i tessuti biologici prossimi al ricevitore/trasmettitore che subiscono comunque un certo riscaldamento.

Da Marconi in poi, il resto è storia recente: negli anni Sessanta del Novecento, i computer cominciano a essere messi in rete per il rapido trasferimento di informazioni, prima per applicazioni militari (siamo in piena guerra fredda), poi per applicazioni civili (orari dei treni, prenotazioni aeree, prenotazioni bancarie)… e non si sono più fermati!

Questa delle reti telematiche è l'ultima frontiera delle telecomunicazioni e, forse, la più promettente, quella che con ogni probabilità modificherà più di ogni altra tecnologia la consapevolezza del *villaggio globale* in cui viviamo.

Il mondo nella rete

A rappresentare la sintesi estrema del villaggio globale, insieme e forse ancor più del telefonino cellulare che permette a chiunque di comunicare con chiunque altro, pressoché in qualunque parte del mondo si trovino i due interlocutori, è la rete di computer: fittissima, capillare, che avvolge il globo terracqueo con cavi e satelliti.

Tutto è nato meno di cinquant'anni fa: nel 1964 il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti dette il via al progetto *Arpanet*, finanziato dall'*Advanced Research Project Agency*. L'obiettivo, di chiaro interesse militare, era quello di permettere a computer di marche differenti, sparsi in tutti gli USA, di collegarsi e scambiarsi dati (nella fattispecie informazioni segrete militari: si ricordi nuovamente che siamo in guerra fredda).

La rete viene realizzata senza un centro di smistamento, perché deve essere resistente a eventuali attacchi, anche atomici. È *Arpanet* la madre di tutte le reti. Nel frattempo venivano svolti gli studi per collegare computer mettendoli in comunicazione tramite la semplice rete telefonica: l'apparecchio che permette a chiunque possieda un computer e un telefono di entrare nelle maglie della rete si chiama *modem* (contrazione delle

parole modulatore-demodulatore) e rappresenta, in ultima analisi, la sintesi fra informatica e telecomunicazioni.

Negli anni che seguirono la rete *Arpanet* divenne operativa, incrementando rapidamente il numero di nodi collegati (oltre a quelli militari, cominciano a mettersi in rete anche le università) e anche gli argomenti trattati, di cui alcuni divennero pubblici. Risalgono al 1975 le prime conferenze elettroniche distribuite via computer (adesso note come *mailing list*, cioè liste di posta), la più affollata delle quali era *SF-Lovers* (*Science Fiction Lovers*) frequentata, appunto, dagli appassionati di fantascienza. Tre anni prima, sempre negli USA, era nata *Telenet,* la prima rete telematica commerciale.

Si giunge così agli anni Ottanta del secolo scorso, che vedono da una parte una sempre maggiore connessione a livello mondiale fra centri di ricerca, università, nodi militari e così via, grazie alla copertura globale fornita dai satelliti per telecomunicazioni, dall'altra, conseguente al boom dei personal computer, la nascita di reti amatoriali – comunemente note con la sigla BBS (*Bulletin Board System*) – la più importante delle quali è sicuramente *Fidonet*, diffusa a livello mondiale, le quali sfruttano le potenzialità dei modem, ormai entrati in commercio, con prestazioni sempre più elevate (importante è la velocità di trasmissione, indicata in *bps*, cioè *bit* per secondo) e a prezzi sempre più accessibili.

Anche le università, dicevamo, cominciano a sviluppare la prima rete di ricerca istituzionale che prende il nome di *Bitnet*, mentre da *Arpanet* si stacca definitivamente il settore militare che prenderà il nome di *Milnet* (da *Military Network*). È curiosa l'origine del nome *Bitnet*, che non ha niente a che vedere con il nome *bit*: è l'acronimo dell'espressione inglese "*Because It's Time Network*", cioè "perché è ora di mettersi in rete!". Con questo, le università statunitensi volevano sottolineare il ritardo con cui era giunto il finanziamento per la connessione fra centri di ricerca civili in confronto con quelli per scopi militari.

Anche l'Europa non sta a guardare e comincia dapprima la sperimentazione dei servizi noti in Italia con il nome *Videotel* (il primo è

in Francia ed è del 1980, il *Minitel*), poi inizia la vera e propria ramificazione di reti di computer. L'equivalente europeo di *Bitnet* prende il nome di EARN (*European Academic Research Network*), mentre anche in Italia cominciano a svilupparsi i primi BBS. Gli anni Novanta del Novecento testimoniano una crescita esponenziale delle connessioni in rete, sia essa dedicata che per via telefonica, da parte di enti pubblici, istituzioni private, centri commerciali, privati cittadini. Le «autostrade elettroniche», come le definì Al Gore, vicepresidente degli Stati Uniti all'epoca della presidenza di Bill Clinton, sono ora una realtà.

Questa è la storia avvincente delle reti di computer. Curiosamente non abbiamo mai fatto menzione di Internet, la rete per eccellenza. Per la verità, infatti, non esiste ufficialmente nessuna rete con questa denominazione, non si tratta cioè né di un'operazione commerciale né di un ente di ricerca con scopi precisi: Internet non è altro che l'insieme delle molte reti che hanno adottato come protocollo di comunicazione quello originario di *Arpanet*, il TCP/IP (*Transmission Control Protocol*/*Internet Protocol*) e che possono essere viste, perciò, come sportelli simili di uno stesso ente sebbene siano gestite da enti diversi. In pratica, espresso in termini semplici, un protocollo di comunicazione è un programma che permette a 2 computer connessi in rete di "vedersi" e di comunicare in termini reciprocamente comprensibili: come dire, farli parlare lo stesso linguaggio.

Internet perciò è un coacervo di servizi e di enti disseminati sul nostro pianeta: da qui il nome, che è una semplice contrazione dell'espressione *International Network*. Chi si connette a Internet vi troverà università, istituti di ricerca, amministrazioni pubbliche, aziende commerciali, istituzioni private, organizzazioni di vario genere, con ciascuna delle quali poter scambiare informazioni. Posta elettronica, conferenze e dialoghi telematici, *chat* (chiacchiera) multiutente e ancora forum telematici, banche dati di ogni genere e via dicendo: si passa da dati scientifici a commenti sugli ultimi film usciti, da discussioni musicali a conferenze sull'AIDS o la fame nel mondo.

Il *carnet* di offerte è impressionante e per poter viaggiare liberamente nel cosiddetto “ciberspazio” (cioè lo spazio virtuale delle reti telematiche) occorre essere dei provetti cibernauti, navigatori di uno spazio etereo, astratto e invisibile, ma non per questo meno reale.

Dal punto di vista delle dimensioni e della distribuzione geografica di nodi, le reti sono classificate in LAN (da *Local Area Network*, cioè rete di area locale), e WAN (da *Wide Area Network*, cioè rete di area ampia).

Le LAN, chiamate anche reti locali, indicano una tipologia di rete che coinvolge per esempio uffici o, comunque, strutture fisicamente vicine o dislocate in edifici non troppo distanti tra loro (entro qualche kilometro): questo genere di reti può andare da due postazioni (ovviamente il minimo perché si possa parlare di rete!) fino a qualche decina, tutte tipicamente operanti con sistemi operativi particolari, in grado di gestire le risorse.

Le WAN, note anche come reti geografiche, connettono nodi distanti centinaia di kilometri, mettendo quindi in comunicazione sistemi distribuiti su un territorio molto più vasto. In genere una WAN connette diversi sottoinsiemi di reti locali. In entrambi i casi comunque, la connessione è fisica, tramite cioè un cavo dedicato che stabilisce un contatto costante fra i diversi computer (ma le risorse di una LAN possono essere connesse anche in modalità *wireless*, sfruttando per esempio le connessioni *wi-fi*).

A differenza delle LAN e delle WAN, in cui gli elaboratori sono permanentemente in contatto fisico fra loro, in un collegamento telematico che tipicamente sfrutta una rete già esistente, quella telefonica, si semplificano le necessità di connessione e si realizzano solo quando servono.

L’unico inconveniente è che la rete telefonica tradizionale non è esplicitamente pensata per scambi digitali di dati, come invece richiedono gli elaboratori elettronici. A questo sopperisce il modem che è, appunto, un convertitore analogico-digitale. Esso infatti modula il segnale digitale del computer e lo trasforma in segnale analogico, rendendo possibile il suo trasferimento lungo la linea telefonica. All’altro capo un altro modem

demodula il segnale ricevuto ritrasformandolo in digitale e rendendolo così comprensibile al computer ricevente.

Dai vecchi e lentissimi modem analogici – che trasmettevano dati a 300 *bit* per secondo – siamo arrivati, dopo vari sviluppi tecnologici, ai modem ADSL (acronimo dell'inglese *Asymmetric Digital Subscriber Line*) in grado di trasmettere dati sempre sullo stesso supporto, rappresentato dai 2 cavetti della linea telefonica, il cosiddetto *doppino*, arrivando fino a velocità quasi 10.000 volte maggiori.

Con la tecnologia ADSL adesso possiamo accedere a Internet ad alta velocità – o, come si dice tecnicamente, a banda larga (*broadband*, in inglese), facendo riferimento alla larghezza della banda di frequenza su cui opera questa tecnologia di trasmissione – ed essere veramente partecipi delle "autostrade dell'informazione".

A differenza di quanto avviene con il modem tradizionale, che trasmette il segnale lungo la linea telefonica in modalità analogica, il modem ADSL codifica e trasmette il segnale in modalità digitale (da cui il termine *digital*) a partire dal lato utente della linea telefonica (*subscriber line*).

L'espressione "linea asimmetrica" si riferisce al fatto che la velocità di ricezione dei dati è in genere molto più alta di quella di invio. In altre parole, nelle linee ADSL esiste un'asimmetria fra la velocità dei dati in ingresso e quella dei dati in uscita. Questo è fatto per motivi di ottimizzazione d'uso della linea, in quanto ci si aspetta che le utenze domestiche chiedano più informazioni, ovvero più dati, di quante ne forniscano. Altre modalità di trasmissione con tecnologia DSL sono già operative (simmetriche, ad altissima velocità ecc.) e altre sono ancora allo studio, ma ormai la strada delle connessioni domestiche ad alta velocità – e a costi sempre più bassi – è tracciata ed è impossibile tornare indietro.

Le reti di computer offrono davvero grandissime possibilità di impiego e di applicazione, aprendo nuovi scenari tecnologici e contribuendo in maniera radicale alla strutturazione di un nuovo modello di società, basata appunto sullo scambio di informazioni a distanza. Nuove figure professionali, nuove competenze, notevoli capacità di apprendimento e di

aggiornamento, grande sviluppo della creatività: questo le reti offrono e contemporaneamente richiedono.

Fra le applicazioni più evidenti della telematica ci sono quelle che consentono un accesso a risorse di calcolo e a strumentazioni poste in luoghi distanti fisicamente dalla propria sede. Aggiornamento e manutenzione del *software* di un computer da parte di un programmatore connesso via rete, controllo a distanza di apparecchiature e macchine (controllo remoto), corsi di istruzione, di aggiornamento o di autoistruzione attraverso lezioni a distanza e distribuzione di materiale didattico per posta elettronica o attraverso interfacce Web sono solo alcuni campi di impiego, già attivi da tempo, dei collegamenti via rete di computer. Per arrivare fino al telelavoro, ovvero alla possibilità di svolgere le proprie mansioni lavorative stando comodamente seduti alla propria scrivania di casa.

E tutto è cominciato dalla volontà dell'uomo di comunicare con gli altri e di scambiare informazioni.

Le finestre di Bernoulli

Abbiamo appena aperto le finestre per arieggiare un po' la casa. Fuori tira un vento leggero e fresco, proprio quello che ci vuole per cambiare l'aria nelle varie stanze. Ma ecco che, improvvisamente, qualche finestra comincia a sbattere, chiudendosi violentemente.

Evidentemente non avevamo fatto i conti con uno dei princìpi fondamentali della fluidodinamica, quello che va sotto il nome di *principio di Bernoulli*, dal nome di Daniel Bernoulli (1700-1782), scienziato svizzero – nato in Olanda e noto, oltre che per i suoi studi di fisica, anche per importanti contributi in campo matematico – che lo enunciò nel 1738 pubblicando i risultati delle sue ricerche sull'argomento in un trattato intitolato *Hydrodynamica*.

Nella sua formulazione più semplice, quella che fa esattamente al caso nostro, il principio di Bernoulli, chiamato talvolta anche *effetto Bernoulli*,

afferma che in un fluido – aeriforme o liquido che sia – la pressione diminuisce all’aumentare della velocità. In altre parole, quanto più è veloce il movimento di un fluido, tanto minore è la sua pressione.

Ora, all’interno di una casa l’aria (che è naturalmente un fluido, come anche l’acqua) è certamente sempre in movimento – è sufficiente che ci sia per esempio anche una lieve differenza di temperatura fra una zona e un’altra di una stanza perché l’aria si muova –, ma la sua velocità è praticamente sempre inferiore a quella dell’aria che si trova all’esterno.

Per il principio di Bernoulli, quindi, l’aria interna ha una pressione maggiore di quella esterna, ragione per cui sull’anta della finestra, sottoposta a questa differenza di pressione, si genera una spinta netta dall’interno verso l’esterno che la costringe a chiudersi. Naturalmente, maggiore è questa differenza di pressione, maggiore è la spinta sull’anta che può arrivare a sbattere anche violentemente. Attenzione quindi ad aprire le finestre in una giornata di forte vento!

Il principio di Bernoulli trova un’altra interessante applicazione domestica. La potete sperimentare quando vi trovate in una casa di montagna con un bel camino acceso. L’aria calda intorno al fuoco, infatti, tende a salire verso l’alto a causa della sua minore densità rispetto all’aria fredda circostante, incanalandosi lungo la canna fumaria. Ma ad aiutare questa salita c’è sicuramente anche il movimento dell’aria sopra il tetto, che crea un risucchio a causa della differenza di pressione fra l’aria all’interno e l’aria all’esterno della casa. Nel tiraggio di un camino – termine con cui si designa appunto il movimento ascendente dell’aria all’interno di una canna fumaria, fenomeno che assicura da un lato l’eliminazione dei fumi della combustione e dall’altro il necessario apporto di nuovo ossigeno perché la combustione possa proseguire – entra anche in gioco il dislivello di quota presente fra il camino e il comignolo, ovvero il punto in cui la canna fumaria emerge sopra il tetto.

In effetti, nella sua formulazione completa, il principio di Bernoulli afferma che la somma di 3 termini deve rimanere costante: il lavoro compiuto dal fluido, direttamente proporzionale alla sua pressione,

l’energia cinetica del fluido, proporzionale al quadrato della sua velocità, e l’energia potenziale gravitazionale del fluido, direttamente proporzionale alla quota a cui si trova il fluido stesso.

Questa espressione è conosciuta come *equazione di Bernoulli*. Così, nel caso della finestra che sbatte, dove l’aria interna e l’aria esterna sono praticamente alla stessa quota, l’ultimo termine ha lo stesso valore sia per la prima che per la seconda e a variare sono gli altri due. Nel caso del camino, invece, sono presenti tutti e tre i termini: la maggior quota – da cui la maggiore energia potenziale gravitazionale – e la maggior velocità – da cui la maggiore energia cinetica – dell’aria esterna fanno sì che l’aria interna abbia una pressione maggiore che la spinge verso l’esterno.

Anche gli animali che scavano le loro tane sotto terra applicano senza saperlo il principio di Bernoulli. Ogni tana, infatti, ha sempre due ingressi a una certa distanza l’uno dall’altro e, se possibile, anche a quote diverse. In questo modo, poiché l’aria sovrastante un ingresso ha con ogni probabilità una velocità diversa da quella sovrastante l’altro, gli animali si assicurano la circolazione dell’aria e il conseguente ricambio all’interno della tana: questa differenza di velocità ed eventualmente di quota si traducono, per l’equazione di Bernoulli, in una differenza di pressione, sufficiente a far spingere l’aria da una parte all’altra della tana.

Un’altra fondamentale applicazione – non domestica – del principio di Bernoulli la troviamo nel volo degli aerei. Il profilo dell’ala di un aereo, infatti, è disegnato in maniera tale che l’aria che passa sopra il dorso viaggi a velocità maggiore di quella che passa sotto il ventre dell’ala.

Il risultato netto è così una spinta dal basso verso l’alto causata dalla differenza di pressione fra l’aria sopra l’ala – a pressione più bassa – e l’aria sotto l’ala – a pressione più alta. In realtà, questo non è il solo contributo alla cosiddetta *portanza* dell’aereo (ovvero alla forza che lo spinge verso l’alto vincendo il peso, cioè la forza di gravità che, invece, lo tira verso il basso) e il meccanismo con cui gli aerei riescono a sostenersi in volo è più complesso, ma certamente i progettisti di aerei hanno ben presente questo fondamentale principio della fluidodinamica quando

disegnano un aeromobile.

Ancora, il principio di Bernoulli entra in gioco quando andiamo in barca a vela o usiamo un aspirapolvere: in entrambi i casi – nel primo l'aria dalle parti opposte della vela, nel secondo l'aria dalle parti opposte di una turbina rotante azionata da un motore elettrico – una differenza di velocità ai due lati della vela o della turbina si risolve in una differenza di pressione che spinge l'imbarcazione o crea il necessario risucchio per aspirare aria e polvere.

Per come l'abbiamo enunciata, si capisce che la costanza della somma nell'equazione di Bernoulli deriva in maniera diretta dal principio di conservazione dell'energia meccanica. Un altro principio fondamentale della fluidodinamica deriva invece direttamente da un'altra legge della fisica, quella della *conservazione della massa*.

Nella fisica classica, infatti, anche la massa dei corpi di un sistema deve conservarsi, a differenza di quanto avviene nella fisica nucleare e delle particelle, dove si osservano fenomeni in cui una parte della massa viene convertita in energia, secondo la famosa equazione di Einstein che stabilisce l'equivalenza fra queste due grandezze.

Consideriamo per esempio un flusso di acqua che si immette in una tubatura. Se questa tubatura ha un improvviso restringimento, ovvero una riduzione della sezione trasversale alla direzione di moto del fluido, questo deve necessariamente aumentare la propria velocità, poiché la quantità di acqua che attraversa una sezione della tubatura nell'unità di tempo deve rimanere costante. Se non rimanesse tale, infatti, significherebbe che all'interno del tratto di tubo compreso fra le due sezioni è diminuita o aumentata la quantità d'acqua, ovvero che in quel tratto si ha una perdita o un ulteriore apporto di fluido.

La grandezza fisica che permette di definire questo principio di conservazione è la *portata*, che rappresenta la quantità di fluido che attraversa una sezione di area data nell'unità di tempo. Nel caso tipico in cui la sezione di un condotto sia perpendicolare alla velocità della corrente fluida, la portata è molto semplice da calcolare, essendo data dal prodotto

della sezione (ovvero dal valore della superficie attraversata dal fluido) per la velocità del fluido stesso.

Quanto espresso prima, quindi, può essere definito in termini di costanza della portata: ne deriva anche una relazione di proporzionalità inversa fra l'area della sezione e la velocità del fluido che la attraversa. Se l'area della sezione si dimezza, la velocità del fluido raddoppia, viceversa, il raddoppio dell'area della sezione della conduttura implica la riduzione della velocità del fluido di un fattore 2. La costanza della portata è detta anche *equazione di continuità*.

È importante sottolineare che, in tutti i ragionamenti e gli esempi fatti fin qui, abbiamo ipotizzato che il fluido in esame sia incomprimibile, ovvero che non sia possibile diminuirne il volume applicandovi una pressione. In prima approssimazione questa ipotesi è buona per quanto riguarda i liquidi, come l'acqua, ma cessa di essere valida quando si trattano gli aeriformi (gas e vapori).

In pratica, in virtù della legge di conservazione della massa la portata entrante in una tubazione deve essere uguale a quella uscente, ragione per cui, in caso di restringimenti o allargamenti della tubazione stessa, deve cambiare la velocità del fluido al suo interno, aumentando o diminuendo di conseguenza. Le perdite di fluidi dalle condutture vengono proprio scoperte andando a misurare la portata in punti diversi della tubazione. Se fra due misure spazialmente contigue si osserva una variazione di portata, significa che nel tratto di tubazione compreso fra le due sezioni di misurazione si verifica una perdita di fluido. Bisogna quindi correre ai ripari, sia che si tratti di acqua, sia che si tratti di ossigeno, aria, metano, petrolio o qualche altro fluido.

Un'interessante conseguenza del principio di Bernoulli è l'*effetto Venturi*, chiamato così in onore del fisico Giovanni Battista Venturi (1746-1822) a cui si deve la scoperta. Questo fenomeno, facilmente osservabile e misurabile in una corrente liquida all'interno di una conduttura posta orizzontalmente al terreno, consiste in un aumento della pressione del liquido al diminuire della sua velocità. Essendo il liquido tutto alla stessa

quota, in questo caso è possibile applicare il principio di Bernoulli nella sua forma più semplice, dalla quale discende immediatamente l'osservazione dell'effetto Venturi.

Le applicazioni in cui l'effetto Venturi si rivela utile sono molte. Per esempio, questo è proficuamente usato negli spruzzatori. La sezione dell'ugello da cui è costretta a uscire l'aria spinta dal pistone azionato da noi è sufficientemente piccola da abbassare – per effetto Venturi, appunto – la pressione dell'aria in uscita ben al di sotto di quella atmosferica. Così, il liquido da spruzzare può risalire lungo il tubo dal serbatoio in cui è contenuto e uscire dall'ugello miscelato con l'aria che lo ha risucchiato.

Sullo stesso principio si basa anche il funzionamento del carburatore di un motore a scoppio, il cui meccanismo è praticamente identico a quello dello spruzzatore. L'unica differenza sostanziale è data dalla presenza di un opportuno sistema di valvole, il cui movimento, assieme a quello del pistone, contribuisce a mettere in moto l'aria: è l'abbassamento di pressione di questa a richiamare la benzina che viene nebulizzata e immessa sotto forma di miscela aria-benzina nella camera di combustione, dove può infine scoppiare ed espandersi, dando così al pistone la spinta necessaria per proseguire il suo movimento ciclico.

La fluidodinamica è una materia complessa ma, come abbiamo appena visto, senza il suo studio non potremmo far arrivare l'acqua nelle nostre case, né far volare gli aeroplani, né navigare a vela, né tantomeno far funzionare un motore a scoppio. La prossima volta che sentite sbattere una finestra o vi appassionate a una regata velica, pensate a quanta fisica sta dietro fenomeni solo apparentemente semplici ma la cui spiegazione richiede l'applicazione di princìpi non sempre banali e spesso lontani dal senso comune.

Epilogo

Eccoci giunti al termine di questo viaggio scientifico attraverso le stanze della nostra casa. Abbiamo scoperto quanta fisica e quanta tecnologia si celano anche dietro strumenti facili da usare come un televisore, o dietro azioni che eseguiamo in maniera automatica, come accendere una lampadina o aprire un rubinetto dell'acqua. Avremmo potuto scoprire molte più cose, naturalmente: abbiamo svelato i segreti di un centinaio di fenomeni ma ne abbiamo di certo trascurati dieci volte tanti. Tuttavia, se siete riusciti a capire anche solo un decimo di quanto descritto e, magari, vi siete incuriositi al punto da cercare altre letture e ulteriori approfondimenti, be', saremmo davvero molto contenti!

D'altra parte, omissioni, semplificazioni, perdite di rigore scientifico sono necessariamente presenti in tutto il libro (anche qualche errore o imprecisione, probabilmente, per i quali mi scuso e ringrazio sin d'ora chi vorrà segnalarmeli): è il genere stesso di libro – saggio divulgativo – a richiederli. La sfida era cercare di spiegare concetti spesso complessi usando un linguaggio il più possibile semplice e piano: questo ci sarà riuscito meglio in alcune occasioni, peggio in altre. Possiamo solo augurarci che le prime siano molto più numerose delle seconde.

La curiosità è ciò che muove lo scienziato e il ricercatore. Ponetevi continuamente domande, anche quelle che a voi sembrano più banali: abbiamo visto che, in realtà, nessuna domanda è banale, e che molte hanno risposte complesse. Sempre che gli scienziati siano stati in grado di trovarle!

Considerate un laboratorio non solo la vostra casa, ma tutto il mondo che

vi circonda: la fisica è sempre dietro l’angolo, in ogni fenomeno, e aspetta solo di essere chiamata a manifestarsi. È quanto si è cercato di mostrare in queste pagine. Adesso tocca davvero a voi.

Di seguito, troverete una bibliografia a cui potrete far riferimento per trovare ulteriori risposte a domande che vi siete posti e per le quali questo libro non vi è stato sufficientemente d’aiuto, ma soprattutto per scoprire le migliaia di fenomeni, e leggi, e princìpi, ed equazioni, e storie che non vi abbiamo potuto raccontare.

Buone letture, dunque, e… buone sperimentazioni!

Bibliografia

Stilare una bibliografia per un saggio divulgativo come questo non è un'operazione semplice né indolore. Libri che trattano di fisica ne esistono tanti e ai più vari livelli: è chiaro che occorre fare una selezione soggettiva, citando solo quelli che, per nostro gusto e formazione, reputiamo veramente utili a chi voglia approfondire quanto appena letto. Mancano perciò alcuni autori o testi considerati indispensabili per la formazione di un fisico, mentre sono presenti ampi riferimenti alla letteratura divulgativa: da un lato si è preferito citare libri di difficoltà simile a questo, in modo che chi voglia ampliare le proprie conoscenze sull'argomento possa partire senza grossi problemi da ciò che ha appena acquisito; dall'altro si è voluto limitare l'elenco dei veri e propri manuali di fisica di base a quelli veramente fondamentali, senza costringere a sforzi e fatiche inutili. Chi si sentirà davvero motivato, troverà in tutti i libri elencati ampie bibliografie che lo condurranno verso altri lidi e, soprattutto, verso altri e maggiori livelli di approfondimento.

Abbiamo volutamente escluso i libri in lingua straniera: sull'argomento "fisica e dintorni" le biblioteche sono sufficientemente fornite di libri (originali o traduzioni) in italiano perché si possa affrontare la difficoltà dello studio della fisica senza doversi complicare la vita con la comprensione di un'altra lingua. Abbiamo volutamente escluso anche i siti web e le altre risorse di Internet: citandoli, ci sembrava di fare un torto agli autori dei testi elencati; già, perché in italiano, di risorse web originali ce ne sono davvero pochissime: la maggior parte degli scritti in Internet è tratto – estratto o direttamente copiato – da qualche libro pubblicato su

carta o, nella migliore delle ipotesi, copiato da qualche sito in lingua inglese. Ciò non toglie che cercare su Google o consultare Wikipedia o qualche altro sito o enciclopedia *on line* possa essere utile, almeno per rinfrescare un argomento o per trovare “al volo” una definizione. Almeno per ora, tuttavia, soprattutto per quanto riguarda le risorse in italiano, crediamo che leggere un libro sia ancora il modo migliore per avere una visione organica e completa degli argomenti che c’interessano.

Le date di pubblicazione dei libri citati sono quelle delle edizioni da noi consultate. Di alcuni testi, soprattutto di quelli più datati, è possibile che esistano ristampe o edizioni più recenti.

Asimov I., *Il libro di fisica*, Mondadori, Milano 1986.

Bernardini C., *Prima lezione di fisica*, Laterza, Bari 2007.

Bodanis D., *La tua casa segreta*, Mondadori, Milano 2001.

Bridgman P. W., *La logica della fisica moderna*, Boringhieri, Torino 1968.

Caldirola P., *Dalla microfisica alla macrofisica*, Mondadori, Milano 1974.

Calvo M., Ciotti F. e Roncaglia G., *Internet 2004. Manuale per l’uso della rete*, Laterza, Bari 2003.

Caprara G. e Belloni L., *La scienza divertente*, Rizzoli, Milano 2002.

Ceruzzi P.E., *Storia dell’informatica. Dai primi computer digitali all’era di Internet*, Apogeo, Milano 2005.

Dirac P.A.M., *I principi della meccanica quantistica*, Boringhieri, Torino 1978.

Dunbar R., *Non sparate sulla scienza*, Longanesi, Milano 1996.

Fermi E., *Termodinamica*, Boringhieri, Torino 1974.

Feynman R.P., *La legge fisica*, Boringhieri, Torino 1971.

Feynman R.P., *Sei pezzi facili*, Adelphi, Milano 2000.

Fraser J.T., *Il tempo: una presenza sconosciuta*, Feltrinelli, Milano 1992.

Frova A., *Perché accade ciò che accade*, Rizzoli, Milano 1995.

Frova A., *Fisica nella musica*, Zanichelli, Bologna 1999.

Frova A., *La fisica sotto il naso*, Rizzoli, Milano 2001.

Frova A., *Ragione per cui*, Rizzoli, Milano 2004.

Frova A., *Se l'uomo avesse le ali*, Rizzoli, Milano 2007.

Gamow G., *Biografia della fisica*, Mondadori, Milano 1963.

Gamow G., *Trent'anni che sconvolsero la fisica. La storia della teoria dei quanti*, Zanichelli, Bologna 1966.

Heisenberg W., *I principi fisici della teoria dei quanti*, Boringhieri, Torino 1979.

Hewitt P. G., *Fisica per concetti*, Zanichelli, Bologna 1990.

Kuhn T. S., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, Torino 1969.

Licata I., *La realtà virtuale. L'altra storia della fisica quantica*, Di Renzo, Roma 1992.

Masci S., Peres E. e Pulone L., *Fisica. Corso di sopravvivenza*, Ponte alle Grazie, Milano 2004.

Minsky M., *La società della mente*, Adelphi, Milano 1989.

Parisi D., *Intervista sulle reti neurali. Cervello e macchine intelligenti*, il Mulino, Bologna 1989.

Parlangeli A., *La scienza del tostapane. Tecnologia della vita quotidiana*, Boroli, Milano 2005.

Prigogine I., *Le leggi del caos*, Laterza, Bari 2003.

Prigogine I. e Stengers I., *La nuova alleanza*, Einaudi, Torino 1981.

Resnick R. e Halliday D., *Fisica*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano 1982.

Ricci E., *Fisica*, Giunti Editore, Firenze 2007.

Rivieccio G., *Dizionario delle scoperte scientifiche e delle invenzioni*, Rizzoli, Milano, 2001.

Ruelle D., *Caso e caos*, Boringhieri, Torino 1992.

Singer C., *Breve storia del pensiero scientifico*, Einaudi, Torino 1961.

Tabossi P., *Intelligenza naturale e intelligenza artificiale*, il Mulino, Bologna 1988.

Toraldo Di Francia G., *L'indagine del mondo fisico*, Einaudi, Torino 1976.

Walker J., *Il luna park della fisica*, Zanichelli, Bologna 1981.

Wolke R. L., *Al suo barbiere Einstein la raccontava così. Vita quotidiana e quesiti scientifici*, Feltrinelli, Milano 2004.

Zanetti V., *Teoria ed esperimenti di fisica*, Zanichelli, Bologna 1993.

Zemansky M. W., *Calore e termodinamica*, Zanichelli, Bologna 1970.

Ringraziamenti

Un libro come questo non nasce per caso. Né può essere mai veramente di un solo autore. Quello che trovate scritto qui, infatti, è il frutto di anni di studi, numerose letture, altrettante discussioni.

Vorrei perciò ringraziare per primi tutti coloro che, nel corso del tempo, mi hanno fatto appassionare alla fisica, me l'hanno insegnata, me l'hanno fatta capire. Alcuni compagni di liceo e di università, certi professori liceali, molti docenti universitari, tanti autori di libri e articoli, e alcuni amici che condividono con me la mia stessa passione per questa splendida disciplina che spiega l'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande, passando dalla descrizione del comportamento delle particelle subatomiche all'evoluzione dell'universo nel suo insieme. E che è anche in grado, come abbiamo visto, di spiegare le nostre semplici azioni quotidiane. Sarebbero troppi i nomi da citare. Spero che sappiano riconoscersi. A tutti loro va il mio sincero ringraziamento.

Oltre a questo grazie collettivo, voglio offrirne anche qualcuno individuale. A Pino Perla, per alcuni suoi preziosi suggerimenti, a David Pacifici, per il conforto e i consigli su alcune difficili scelte editoriali, e a Guia De Martino Norante, per il lavoro di editing sul manoscritto originale. Ma soprattutto voglio ringraziare Adriana Rigutti, per la pazienza e la continua e instancabile opera di incoraggiamento. Senza questa, difficilmente sarei riuscito a porre la parola FINE a questo libro. Grazie davvero.

L'ultimo grazie, e il più importante, va a mia moglie Ester, per la presenza e il costante e fondamentale supporto mentre ero immerso nella

stesura del manoscritto, e ai miei bimbi Giulia e Leonardo, per aver già perdonato le ore di latitanza del loro papà, perso spesso nei meandri della scienza. Con la speranza che un giorno sappiano apprezzare la fisica, magari anche grazie alla lettura di questo libro.

Argomenti trattati

A

ABC
Acciaio
Acustica
Adesione
- Forze di adesione
ADSL
Agenti attivi di superficie
Aiken
- Howard Aiken
Algoritmi di compressione
Alternatore
AM
Ambiente
Ancia
Anelastica
Anello di feedback
Annals of Improbable Research
Anno
- Anno bisestile
- Anno tropico
Antibolle
Anticiclone
Apribottiglie

Archeoastronomia
Archimede di Siracusa
Armoniche superiori
Arpanet
Asimmetria del tempo
Asse di rotazione terrestre
Asse giroscopico
Asimov
- Isaac Asimov

Assorbimento
Atanasoff
- John Vincent Atanasoff
- *Berry Computer*

Attrito
- Attrito radente
- Attrito statico
- Attrito volvente

B

Babbage
- Charles Babbage

Bagnabilità
Banda larga
Bass
Bastoncelli
BBS
Bell
- Graham Bell

Bernoulli
- Daniel Bernoulli
- Equazione di Bernoulli
- Principio di Bernoulli

Bialetti
- Alfonso Bialetti

Bicicletta

Binary digitterm

Bit

- Bit per secondo
- Profondità di bit

Bitnet

Board of Longitude

Bohr

- Niels Bohr

Bolla di sapone

Boltzmann

- Ludwig Boltzmann

Born

- Max Born

Bps

Braccio della forza

Broadband

Bulletin Board System

Bureau international des poids et mesures di Sèvres

Buys Ballot

- Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot

Byte

Calcolo delle variazioni

Calendario

- Calendario giuliano
- Calendario lunare
- Calendario solare
- Calendario lunisolare

Calore

Campionamento

Campionatori
Campo conservativo
Capacità termica
Čapek
- Karel Čapek
Capillarità
Carico di rottura
Casa intelligente
Caucciù
Central European Time
Centrale elettrica
Centro di gravità
Cesio
CET
CFC
Champagne
Chardin
- Jean-Baptiste-Siméon Chardin
Chiocciola o coclea
Ciclo
- Ciclo alogeno
- Ciclo frigorifero
- Ciclo termodinamico
Ciclone
Clausius
- Rudolf Clausius
Clavius
- Cristopher Clavius
Clorofluorocarburi
Coefficiente
- Coefficiente di assorbimento

- Coefficiente di attrito
  - Coefficiente di attrito statico
  - Coefficiente di attrito radente
  - Coefficiente di attrito volvente

Coefficiente di filtrazione

Coesione
- Forze di coesione

Colore musicale

Composizione armonica

Compressione
- Algoritmi di compressione

Computer

Conducibilità
- Conducibilità elettrica specifica
- Conducibilità termica

Conduttività

Conduzione

Coni

Conservazione della massa

Convezione

Cook
- James Cook

Corpo nero
- Spettro di corpo nero

Corrente elettrica
- Corrente elettrica alternata
- Corrente elettrica continua

Costante elastica

Cray

Cresta di un’onda

Criostato

Cristalli liquidi

CRT
Culminazione

Darcy
- Henry Philibert Gaspard Darcy
De Broglie
- Louis De Broglie
De Coriolis
- Gustave Gaspard De Coriolis
Definizione operativa
Deformazione plastica
De Giorgi
- Ennio De Giorgi
Densità di probabilità
Diagramma
- Diagramma tensione-deformazione
Diffrazione
Diffusori acustici
Digit
Digitale
Digitalizzazione
Dilatazione termica
Dipendenza da condizioni iniziali
Dipolo elettrico
Dirac
- Paul Adrien Maurice Dirac
Domotica
Doppino
Drogaggio

EARN

E

Eckert
- John Eckert

Eclittica

Eco
- Umberto Eco

Eddington
- Arthur Eddington

Edison
- Thomas Alva Edison

EDVAC

Effetto
- Effetto Coriolis
- Effetto farfalla
- Effetto Joule
- Effetto serra
- Effetto sifone
- Effetto Venturi

Einstein
- Albert Einstein

Elasticità

Electronic Discrete Variable Automatic Computer

Electronic Numerical Integrator and Calculator

Elettrodotto

Elettroni di conduzione

ELIZA

Energia cinetica

Energia
- Conservazione dell'energia
- Energia meccanica
- Energia gravitazionale

ENIAC

Entropia
- Entropia cosmica

Equazione
- Equazione del moto del pendolo
- Equazione del moto ondoso
- Equazione del tempo
- Equazione di Maxwell

Equilibrio termico

Errore di quantizzazione

European Academic Research Network

Faraday
- Michael Faraday

Feedback

Ferro battuto

Feynman
- Richard Feynman

Fibre ottiche

Fidonet

Fluido refrigerante

Flusso
- Flusso del miele
- Flusso laminare
- Flusso turbolento

FM

Forbici

Forno a microonde

Forza
- Forza apparente
- Braccio della forza
- Forza centrifuga
- Forza di adesione
- Forza di coesione
- Forza di Coriolis
- Forza di trazione

- Forza fittizia
- Momento della forza

Fosfòri

Fotogrammi

Fotoni

Foucault
- Jean Bernard Léon Foucault

Fovea

Fps, *Frame per second*

Freccia del tempo

Frequenza
- Frequenza di campionamento

Frequenze formanti

Fulcro

Full HD

Funzione d’onda

Fusibile

Fuso orario

Gaber
- Giorgio Gaber

Galilei
- Galileo Galilei

Ghisa

Giorno
- Giorno civile
- Giorno solare
  - Giorno solare medio
  - Giorno solare vero
- Durata del giorno
- Giorno siderale

Giulio Cesare

Global Positioning System

Goltzius
- Hendrick Goltzius
Gomma naturale
Gommapiuma
Goodyear
- Charles Goodyear
GPS
Grandezza estensiva
Granulazione solare
Gravitazione universale
Guerra delle correnti
Guinness Book of Records

HHH
Harrison
- John Harrison
HD, *HD ready*
Heisenberg
- Werner Heisenberg
Hertz
- Heinrich Rudolph Hertz
Hevea brasiliensis
Hewlett
- William Hewlett
High definition
Hollerith
- Herman Hollerith
Home theatre
Hooke
- Robert Hooke
HP
Huygens

- Christiaan Huygens

I

Idrodinamica
Ig Nobel
Impulso
Induttore
Induzione elettromagnetica
Informazione
- Teoria dell'informazione
Intel Core 2 Duo
Intelligenza Artificiale
Intercalazione
Interlaced scan
Internet
Interpretazione probabilistica della meccanica quantistica
Inviluppo della forma d’onda
Irraggiamento
Isocronismo
Isolante
- Isolante elettrico
- Isolante termico

J

Joule
- James Prescott Joule
Jpeg

K

K1
Kelvin
- Kendall Larcum Kelvin

Lampada

L

- Lampada a basso consumo
- Lampada a fluorescenza
- Lampada a incandescenza
- Lampada alogena

LAN

Lana

Latitudine

Lattice

Lavoro

LCD

LED

Legge

- Legge dello spostamento di Wien
- Legge di Buys Ballot
- Legge di Darcy
- Legge di Faraday
- Legge di Hooke
- Legge di Ohm
- Leggi sui robot

Legni

Leopardi

- Giacomo Leopardi

Leva

Light Emitting Diode

Linea

- Linea del cambiamento di data
- Linee di universo

Liquid Crystal Display

Local Area Network

Locke

- John Locke

Longitudine

Lorenz

- Edward Norton Lorenz

Lunghezza d’onda

M

Macchina
- Macchina analitica
- Macchina tabulatrice elettrica

Magnetron

Manet
- Édouard Manet

Marconi
- Guglielmo Marconi

Maskelyne
- Nevil Maskelyne

Master

Materasso

Materiale
- Materiale plastico
- Materiale viscoelastico

Mauchly
- John Mauchly

Maxwell
- James Clerk Maxwell

Meccanica
- Meccanica matriciale
- Meccanica ondulatoria
- Meccanica statistica

Menisco

Meridiano
- Meridiano centrale del fuso
- Meridiano di Greenwich
- Meridiano locale

Mese sinodico

Meucci
- Antonio Meucci

Microonde

Microscopio
Midrange
Miele
Milnet
Minitel
Miscelatore
Modem
Modulazione
- Modulazione di ampiezza
- Modulazione di frequenza
Modulo
- Modulo di elasticità
- Modulo di Young
- Modulo di rottura
Moka
Molecola d'acqua
Molla
Momento
- Momento angolare
- Momento d'inerzia
- Momento di una forza
Morse
- Samuel Morse
Morte termica
Moto
- Moto apparente del Sole
- Moto armonico semplice
  - di una molla
  - di un pendolo
- Moto di precessione
- Moto di rivoluzione
- Moto di rotazione
- Moto ondoso
- Moto periodico

Mp
Mpeg

N

Newton
- Isaac Newton

Nota fondamentale

O

Occhio
Ohm
- Georg Simon Ohm

Olio lubrificante
Onda
- Cresta dell'onda
- Valle dell'onda
- Onda di pressione
- Onda portante
- Onde elettromagnetiche

Orecchio
Organo del Corti
Organologia
Origine (sistema di riferimento)
Orologio
Oscillatore armonico
Osservatore inerziale
Ossicini
Ottica
- Ottica fisica
- Ottica geometrica

Ottoni

P

PAL
Packard
- David Packard

Papa Gregorio XIII
Papin
- Denis Papin
Parnell
- Thomas Parnell
Pascal
- Blaise Pascal
Pascalina
Pellicola fotografica
Pendolo
- Pendolo di Foucault
Penna stilografica
Pentola a pressione
Pérignon
- Dom Pierre Pérignon
Periodo
- Periodo del pendolo
- Periodo di un onda
Persistenza della visione
Phase alternating line
Picture element
Pixel
Pizzicato
Planck
- Max Planck
Plateau
- Antoine Ferdinand Plateau
Poliuretano
Portanza
Portata
Potenza elettrica

Precessione
Pressione
Princìpi della termodinamica
Principio
- Principio d’inerzia
- Principio di complementarietà
- Principio di conservazione dell’energia
- Principio di corrispondenza
- Principio di indeterminazione
Probabilità
- Densità di probabilità
Problema di Plateau
Progressive scan
Propagazione di onde sonore
Punto
- Punto fisso campione
- Punto triplo dell’acqua

Q

Quanti di luce
Quantità di moto
Quantizzazione
Quarzo
Quiete atomica

R

Radiazione
- Radiazione infrarossa (raggi i.)
- Radiazione ultravioletta
- Radiazione visibile
Rapporto di trasformazione
Reazione vincolare
Re Giorgio III d’Inghilterra
Resilienza
Resistenza

Resistività
Rete di un letto
Reti neurali
Retina
Retroazione
Riflessione
Riforma gregoriana
Rifrazione
Riporto automatico
Riscaldamento
- Riscaldamento dielettrico
- Riscaldamento globale
Riverbero
Rivoluzione d’ottobre
RNARNB
Robot
Rotazione
Rotore
Rototraslazione

Sala acustica
Sampler
Sant’Agostino
Scala Celsius o centigrada
Scala Internazionale
Scala
- Scala Kelvin
- Scala termodinamica assoluta delle temperature
Scaldino
Schiaccianoci

Schiuma

Schreyer

- Helmut Schreyer

Schrödinger

- Erwin Schrödinger

Shannon

- Claud Elwood Shannon

Shaw

- Robert Stetson Shaw

Sciacquone

Scienza

- Scienza del caos
- Scienza dei materiali

Scuola di Copenaghen

Secondo

Segnale orario

Semiconduttore

Sensibilità spettrale

Sifone

Sintetizzatore

Sistema

- Sistema caotico
- Sistema di riferimento
  - Sistema di riferimento inerziale
  - Sistema di riferimento non inerziale
- Sistema di scansione
  - Sistema di scansione interlacciato
  - Sistema di scansione progressivo
- Sistema fisico periodico
- Sistema solare
- Sistemi esperti

Sole

Solido

Spencer

- Percy Spencer
Spettro
- Spettro armonico
- Spettro di corpo nero
Stadera
Statore
Stella Polare
Strain
Stress
Stress-strain
Strumenti musicali
Subwoofer
Suono
Surfattanti
Surround
Synth

T

Taglio
- Sforzi di taglio
TAI
TCP/IP
Telecomando
Telefono
- Telefono cellulare
Telegrafo
- Telegrafo elettrico
- Telegrafo ottico
Telescopio
Televisore al plasma
Temperatura
- Temperatura di ebollizione
- Temperatura di gas perfetto

Tempo
- Tempo Atomico Internazionale
- Tempo Medio dell'Europa Centrale
- Tempo solare medio
- Tempo Universale

Tenacia dell'asse giroscopico

Tensioattivi

Tensione
- Tensione di snervamento
- Tensione elettrica
- Tensione superficiale

Teorema del campionamento

Teoria della relatività

Termine binario

Termocoperta

Termodinamica
- Enunciato di Clausius
- Enunciato di Kelvin
- Princìpi della termodinamica

Termometro

Termoregolazione

Termostato

Tesla
- Nikola Tesla

Test di Turing

Tetrafluoroetano

Thomson
- William Thomson (Lord Kelvin)

Timbro (sonoro)
- Timbro della voce

Timpano
- Timpano dell'orecchio
- Timpano da orchestra

TMEC
Traiettoria
Transizione
- Transizione al caos
- Transizione di fase
- Transizione fra due livelli
Transmission Control Protocol/Internet Protocol
Trasformatori
Trasformazione
- Trasformazione di energia o energetica
Traslazione
Trasporto del calore
Trazione
Treble
Troppopieno
Trottola
TU
Tubo catodico
TUC
Tungsteno
Turbina
Tukey
- John Tukey
Tweeter

UNIVAC
Urto
- Urto anelastico
- Urto elastico
UT

UTC

Valle di un’onda
Valvola di sicurezza
Variabile indipendente
Variabili coniugate
Vasi comunicanti
Velocità della luce
Venturi
- Giovanni Battista Venturi
Verne
- Jules Verne
Videotel
Villaggio globale
Viscosità
Visione distolta
Visore notturno
Viviani
- Vincenzo Viviani
Von Neumann
- John Von Neumann
Vulcanizzazione

WAN
Weizenbaum
- Joseph Weizenbaum
Wide Area Network
Widescreen
Wien
- Wilhelm Wien
Wiener
- Norbert Wiener

Wireless
Woofer

Y

Young
- Thomas Young

Z

Zenit
Zero assoluto
Zuse
- Konrad Zuse